



Avaliação e caracterização da variabilidade espacial da fertilidade do solo numa parcela de milho. Elaboração das cartas de prescrição.

Rita de Jesus Tomaz da Costa de Novaes e Ataíde

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Agronómica

Orientadores: Doutor Ricardo Nuno Fonseca Garcia Pereira Braga

Doutor Nuno Renato da Silva Cortez

Júri:

Presidente: Doutor José Luís Monteiro Teixeira, Professor Associado do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Vogais: Doutor Henrique Manuel Filipe Ribeiro, Professor Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Doutor Ricardo Nuno Fonseca Garcia Pereira Braga, Professor Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Agradecimentos

Quero agradecer a todas as pessoas que durante esta etapa contribuíram, de uma forma ou de outra, na realização deste trabalho, em especial:

Aos meus orientadores: o Professor Ricardo Braga por ter aceite este desafio, pela disponibilidade demonstrada, pelos seus conselhos, conhecimentos e contributo ao longo da realização deste trabalho; o Professor Nuno Cortez, por ter disponibilizado toda a ajuda necessária e ensinamentos para compreender toda a parte edáfica que este trabalho requereu.

Ao Engenheiro João Coimbra e toda a sua família, por terem disponibilizado uma parcela da sua herdade para a realização do trabalho, por todos os conselhos, ensinamentos e contributo.

Ao Manuel Penteado, pela ajuda, ensinamentos e acompanhamento na recolha de dados e amostras desta dissertação.

A toda a equipa que opera no laboratório de pedologia do Instituto Superior de Agronomia, em especial à João, incansável durante o processo das análises de solos.

Aos meus amigos Francisco Medeiro, António Quadros e Costa, Francisco Silva Marques e António Lourenço por toda a amizade, apoio e companheirismo durante o mestrado, e pela ajuda nesta dissertação.

À Micas por toda a amizade, companhia e motivação na etapa final deste trabalho.

À avó Luísa por toda a preocupação demonstrada e por toda a incansável motivação que me deu ao longo do trabalho.

Aos meus amigos por me terem apoiado incansavelmente ao longo deste trabalho, um obrigada especial aos colegas do Instituto Superior de Agronomia.

Por fim, e não menos importante, aos meus pais e irmãos por todo o apoio e educação ao longo da minha vida e por me terem proporcionado a oportunidade de concluir a minha formação profissional.

Resumo

Produzir mais com menos *inputs* e custos é o grande objetivo dos agricultores. Nesse sentido, a agricultura de precisão (AP) permite, com auxílio das tecnologias associadas, obter conhecimento mais detalhado do terreno, para se aplicar diferenciadamente fatores de produção, consoante a variabilidade espacial e as necessidades das culturas.

O solo é base fundamental da agricultura, é nele que as plantas crescem e se desenvolvem. É fundamental, no âmbito da AP, compreender bem as dinâmicas do solo, as propriedades e variabilidade espacial.

O objetivo desta dissertação passa por avaliar e caracterizar a variabilidade espacial da fertilidade de uma parcela de milho, para posteriormente se poder elaborar cartas de prescrição. Outro propósito foi aferir os nutrientes limitantes à produtividade.

Foram recolhidas 41 amostras de solo para análise laboratorial, para quantificar o valor de cada nutriente em cada local amostrado. Os teores dos nutrientes foram submetidos a interpolação espacial, para perceber os níveis nutricionais existentes em toda a parcela. Com os dados obtidos por interpolação espacial, e sabendo as necessidades nutricionais do milho, efetuaram-se as cartas de prescrição.

Foram abertos 3 perfis de solo na parcela dos quais foram recolhidas amostras de cada horizonte para análise mecânica, de forma a aferir as texturas dos solos.

Concluiu-se que a medição da variabilidade espacial e mapeamento de uma parcela, são ferramentas importantes para o agricultor, permitindo a este atuar de forma mais precisa. Concluiu-se também que os fatores limitantes à produtividade são os micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn), pois apresentam correlação elevada com a produtividade (39%, 56%, 36% e 48% respetivamente). Verificou-se ainda que um maior teor de argila e areia grossa afetam negativamente a produtividade (- 36% correlação com a argila e - 49% de correlação com a areia grossa).

Palavras-chave: agricultura de precisão; variabilidade espacial; fertilidade; análises de solos; cartas de prescrição.

Abstract

The main objective of all farmers is to produce more with the least cost and input possible, meaning, making crops cost effective. In order to achieve this, precision agriculture and associated technologies are used to obtain a more detailed knowledge of the terrain in order to apply differentiated factors of production, depending on the spatial variability and crop needs.

Soil is the fundamental basis of agriculture, for it is where plants grow and develop. It is fundamental, in the scope of precision agriculture, to have a complete understanding of the dynamics of the soil, as well as its properties and its spatial variability.

The objective of this dissertation is to evaluate and characterize the spatial variability of the fertility of a plot of corn, in order to elaborate prescription maps. It is also an important goal, to gauge the nutrients limiting productivity.

A total of 41 soil samples were collected for laboratory analysis to quantify the value of each nutrient in each sampled site. The nutrient contents were submitted to spatial interpolation so we can understand the nutritional levels in the whole plot. With the data obtained by spatial interpolation, and by knowing the nutritional needs of the corn, it is possible to make the prescription maps.

Three soil profiles were opened in the plot, from which samples were collected from each horizon to determine soil moisture and mechanical analysis, in order to assess soil textures.

It was concluded that the measurement of spatial variability and mapping of a plot are important tools for the farmer, allowing him to act more accurately. Micronutrients (Fe, Mn, Cu and Zn) were also the limiting factors for productivity, since they showed a high correlation with productivity (39%, 56%, 36% and 48% respectively). It was also verified that a higher content of clay and coarse sand affects negatively the productivity (- 36% correlation with clay and - 49% correlation with coarse sand).

Keywords: precision agriculture; spatial variability; fertility; soil analysis; prescription maps.

Índice

Agradecimentos	ii
Resumo.....	iii
Abstract	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Quadros	ix
Lista de acrónimos e símbolos (unidades)	x
1. Introdução	1
1.1 Objetivos	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Agricultura de Precisão	3
2.1.1 Conceito	3
2.1.2 Tecnologia	4
2.1.2.1 GPS	4
2.1.2.2 Sistemas de Informação Geográfica.....	5
2.1.2.3 Monitores de produtividade	6
2.1.2.4 VRT – Tecnologia de taxa variável.....	7
2.1.2.5 Análises de solos	8
2.1.2.6 Deteção remota	9
2.2. A cultura do milho	11
2.2.1 Fases desenvolvimento da cultura do milho.....	11
2.2.2 Necessidades nutricionais.....	12
2.2.2.1 Macronutrientes principais	12
2.2.2.2 Macronutrientes secundários	14
2.2.2.3 Micronutrientes	14
2.3. Condutividade elétrica aparente.....	15
2.3.1 Sensor EM38.....	17
2.3.2 Sensor Veris.....	18
2.4. Amostragem de solo	19
2.5. Interpolação espacial	21
2.5.1 <i>Inverse Distance Weight</i>	21
2.5.2 <i>Kriging</i>	21
3. Material e métodos.....	24
3.1. Caracterização da área em estudo.....	24
3.1.1 Localização da parcela.....	24
3.1.2 Caracterização climática.....	25

3.1.3 Caracterização edáfica	27
3.1.4 Produtividade 2016	28
3.1.5 Condutividade elétrica 2016	29
3.2. Delineamento experimental	30
3.2.1 Amostragem, recolha e análise de solos	30
3.2.2 Abertura e descrição dos perfis de solo	32
3.2.2.1 Análises das amostras	33
3.2.2.1.1 Análise de massa volúmica aparente	33
3.2.2.1.2 Determinação da humidade do solo	34
3.2.2.1.3 Análise mecânica	35
3.2.2.2 Descrição dos perfis	39
3.2.3 Interpolação espacial dos dados das amostras	42
3.2.4 Elaboração das cartas de prescrição	43
3.2.5 Análise estatística	43
4. Resultados e discussão	44
4.1. Estatística descritiva	44
4.2. Análise de correlação	46
4.3. Distribuição espacial	53
4.3.1 Macronutrientes	54
4.3.2 Micronutrientes	56
4.3.3 Bases de troca	60
4.3.4 Matéria Orgânica e relação C/N	62
4.3.5 pH	63
4.3.6 Variograma	64
4.4. Relação entre produtividade, condutividade e perfis de solo analisados	65
4.5. Cartas de prescrição	68
4.5.1 Macronutrientes principais	68
4.5.2 Macronutrientes secundários	70
4.5.3 Micronutrientes	71
5. Conclusões	75
6. Bibliografia	77
7. Anexos	84

Índice de Figuras

Figura 1. Ciclo da agricultura de precisão.	4
Figura 2. Constelação de satélites que orbitam a terra, com 4 deles no mesmo plano.	5
Figura 3. Ilustração do posicionamento de um utilizador de GPS através de triangulação.	5
Figura 4. Ilustração das camadas de informação de um SIG	6
Figura 5. Ilustração de um mapa de produtividade na Quinta da Cholda.	7
Figura 6. Exemplo de uma carta de prescrição para aplicação de fósforo em VRT.	8
Figura 7. Instrumentos de obtenção de informação no âmbito da deteção remota.	9
Figura 8. Ilustração do espectro eletromagnético.	10
Figura 9. Fenologia do milho: estados de desenvolvimento da cultura.	12
Figura 10. Ilustração do sensor EM38 quando posicionado vertical (1) e horizontalmente (2).	18
Figura 11. Ilustração do funcionamento do sensor Geonics EM38	18
Figura 12. Ilustração do funcionamento de um sensor de contacto para medição da CEa do solo.	19
Figura 13. Ilustração da amostragem por grade (grid sampling).	20
Figura 14. Ilustração da amostragem inteligente.	21
Figura 15. Variograma.	23
Figura 16. Ilustração da parcela Lameiras	24
Figura 17. Diagrama ombrotérmico de Gaussen para Santarém, período de 1971 a 2000.	26
Figura 18. Diagrama ombrotérmico de Gaussen para Santarém em 2016	26
Figura 19. Carta de solos da parcela em estudo	27
Figura 20. Carta de produtividade do ano 2016.	28
Figura 21. Mapa de condutividade elétrica do solo medida no ano de 2016.	29
Figura 22. Ilustração dos pontos de amostragem da parcela Lameiras.	30
Figura 23. Locais onde foram abertos os perfis de solo consoante a produtividade do ano 2016 (esquerda) e a condutividade elétrica (direita).	32
Figura 24. Fotografia tirada durante a observação e recolha de amostras dos perfis de solo.	33
Figura 25. Balança analítica de precisão usada para pesar a terra fina.	35
Figura 26. Utensílios usados na crivagem das amostras (esquerda – almofariz; direita – crivo).	36
Figura 27. Pesagem dos sacos com os elementos separados na crivagem.	37
Figura 28. Perfil de solo 1	40
Figura 29. Perfil de solo 2	41
Figura 30. Perfil de solo 3	42
Figura 31. Carta de variabilidade espacial de N expressado em g/kg	55
Figura 32. Carta de variabilidade espacial de P expressado em mg P2O5/kg obtido pelo método de Egner-Riehm	55
Figura 33. Carta de variabilidade espacial de P expressado em mg P2O5/kg obtido pelo método de Olsen	56

Figura 34. Carta de variabilidade espacial de K expressado em mg K ₂ O/kg obtido pelo método de Egner-Riehm	56
Figura 35. Carta de variabilidade espacial do Fe obtido pelo método de extração de Lindsay e expressado em mg Fe/kg.	57
Figura 36. Carta de variabilidade espacial do Mn obtido pelo método de extração de Lindsay e expressado em mg Mn/kg.....	58
Figura 37. Carta de variabilidade espacial do Zn obtido pelo método de extração de Lindsay e expressado em mg Zn/kg.	59
Figura 38. Carta de variabilidade espacial do B obtido pelo método de extração de água fervente e expressado em mg B/kg.	59
Figura 39. Carta de variabilidade espacial do Cu obtido pelo método de extração de Lindsay e expressado em mg Cu/kg.	60
Figura 40. Carta de variabilidade espacial do Ca de troca expressado em cmol(c)/kg.	61
Figura 41. Carta de variabilidade espacial do Mg de troca expressado em cmol(c)/kg.	61
Figura 42. Carta de variabilidade espacial do K de troca expressado em cmol(c)/kg.	62
Figura 43. Carta de variabilidade espacial do Na de troca expressado em cmol(c)/kg.....	62
Figura 44. Carta de variabilidade espacial da % matéria orgânica no solo.	63
Figura 45. Carta de variabilidade espacial da relação entre o C e o N.....	63
Figura 46. Carta de distribuição espacial do pH em água.	64
Figura 47. Carta de distribuição espacial do pH em KCl.	64
Figura 48. Mapa de prescrição de azoto em kg/ha.	69
Figura 49. Mapa de prescrição de fósforo em kg/ha.	69
Figura 50. Mapa de prescrição de potássio em kg/ha.	70
Figura 51. Mapa de prescrição de magnésio em kg/ha.	70
Figura 52. Mapa de prescrição de ferro em kg/ha.....	71
Figura 53. Mapa de prescrição de manganês em kg/ha.....	72
Figura 54. Mapa de prescrição de zinco em kg/ha.....	72
Figura 55. Mapa de prescrição de boro em kg/ha.	73
Figura 56. Mapa de prescrição de cobre em kg/ha.....	74

Índice de Quadros

Quadro 1. Extração média de nutrientes pela cultura do milho em kg/ha.	14
Quadro 2. Extração de micronutrientes por tonelada de milho produzida.....	15
Quadro 3. Teores foliares de nutrientes considerados adequados à cultura do milho.	15
Quadro 4. Classes de salinidade dos solos.	16
Quadro 5. Tempo de sedimentação para pipetagem das frações limo+argila e argila a 10 cm de profundidade.....	38
Quadro 6. Estatística descritiva dos resultados das amostras de solo.	45
Quadro 7. Análise de correlação dos parâmetros com 41 valores ($p<0,05$). A azul estão os valores com correlação ligeira e a encarnado os significativamente relacionados.	49
Quadro 8. Análise de correlação dos parâmetros com 27 valores ($p<0,05$). A azul estão os valores com correlação ligeira e a encarnado os significativamente relacionados.	50
Quadro 9. Análise de correlação dos parâmetros com 7 valores ($p<0,05$). A azul estão os valores com correlação ligeira e a encarnado os significativamente relacionados.	51
Quadro 10. Análise de correlação da produtividade com os parâmetros medidos laboratorialmente ($p<0,05$). A azul estão os valores com correlação ligeira e a encarnado os significativamente relacionados.	52
Quadro 11. Quadro relativo aos níveis de fertilidade dos nutrientes no solo.....	53
Quadro 12. Quadro relativo às classes de teor da relação C/N no solo.	54
Quadro 13. Quadro relativo às classes de acidez/alcalinidade de um solo.	54
Quadro 14. Valores de cada parâmetro dos variogramas das variáveis.	65
Quadro 15. Quadro relativo às texturas, massas volúmicas aparentes, % de porosidade, teores de nutrientes e produtividade relativas ao perfil 1 e respectivos horizontes amostrados.	66
Quadro 16. Quadro relativo às texturas, massas volúmicas aparentes, % de porosidade, teores de nutrientes e produtividade relativas ao perfil 2 e respectivos horizontes amostrados.	67
Quadro 17. Quadro relativo às texturas, massas volúmicas aparentes, % de porosidade, teores de nutrientes e produtividade relativas ao perfil 3 e respectivos horizontes amostrados.	68

Lista de acrónimos e símbolos (unidades)

(NaPO₃)₆ – hexametáfosfato de sódio

µm – Micrómetro

3D – Tridimensional

AP – Agricultura de Precisão

B – Boro

C – Carbono

CEa – Condutividade elétrica aparente

cm - Centímetros

Cu – Cobre

FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

Fe – Ferro

GPS – Global Positioning System

ha – Hectare

IDW – Inverse distance weight

INE – Instituto Nacional de Estatística

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

K – Potássio

kHz – Quilohertz

mm – milímetro

Mn - Manganês

N – Azoto

NDVI – Índice de densidade de vegetação

NIR – Near Infrared (Infravermelho Próximo)

Ø – diâmetro

P – Fósforo

PCD – Plant cell density

PLC – Programmable logic controller

PVR - Photosintetic vigor ratio

RGB – Red Green Blue

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SROA – Serviço de Reconhecimento e de Ordenamento Agrário

USDA – United States Department of Agriculture

UTAD – Universidade Trás-os-Montes e Alto Douro

VRT – Tecnologia de taxa variável

Zn – Zinco

1. Introdução

Desde o século passado assistiu-se a uma evolução surpreendente da tecnologia. Esta evolução muito se deveu à revolução industrial, no decurso da qual se generalizou o uso de maquinaria e a consequente automatização de vários processos que, até então eram efetuados, com recurso a mão-de-obra intensiva.

Esta revolução tecnológica teve um enorme impacto na atividade agrícola porque permitiu reduzir significativamente a mão-de-obra, substituindo-a por processos automatizados, mais eficientes e fiáveis, que permitiram aumentar a velocidade e capacidade efetiva de trabalho (área/tempo). Desta forma, ao invés de possuírem e trabalharem pequenas áreas como meio de subsistência (como usualmente acontecia antes de haver máquinas), os agricultores foram aumentando a dimensão dos seus campos de trabalho, passando a encarar a agricultura de uma forma empresarial. Assim sendo, de uma agricultura de subsistência, esta passou a ser maioritariamente reconhecida como atividade empresarial.

Se é inegável que o aumento da dimensão das parcelas, trouxe uma maior eficiência de trabalho agrícola, também é certo que diminuiu o detalhe colocado no tratamento das explorações, não se tomando em devida conta as variabilidades espaciais existentes em cada parcela. Passaram a ser feitas generalizações baseadas em valores médios das parcelas, tratando-as como sendo homogéneas (em termos de solos, nutrientes, água no solo, etc.), ainda que no momento da colheita os valores de produção se revelavam heterogéneos (em quantidade e qualidade), como resultado natural da variação de fatores dentro da parcela. Ou seja, deixou de ser possível ter o mesmo detalhe de gestão em parcelas com 50 ha como o que poderíamos encontrar numa parcela com 1 ha ou ainda menos. Esta perda de detalhe no tratamento das parcelas levou a que, dentro da mesma parcela, haja umas zonas com excesso e outras com défice de determinados fatores de produção (Braga e Pinto, 2012).

Tornou-se então evidente para os agricultores e empresários, que era necessária uma solução para gerir parcelas com grandes dimensões de forma heterogénea, tendo em conta a variabilidade espacial das mesmas. A necessidade de proporcionar uma gestão racional da variabilidade espacial das características de uma parcela, levou ao nascimento do conceito de agricultura de precisão. A agricultura de precisão surge também da necessidade de reduzir o impacto ambiental provocado pelo uso excessivo de fatores de produção tais como fitoquímicos e fertilizantes de síntese, através de uma aplicação mais controlada tendo em conta as necessidades de cada zona da parcela.

Na agricultura de precisão são utilizadas várias tecnologias: GPS, SIG, análises de solos, detecção remota, sistemas de monitorização de produtividade, e aplicações diferenciadas (VRT).

Neste trabalho vai ser dado maior destaque à análise de solos, ferramenta extremamente útil no que toca ao estudo das diferentes propriedades do solo, dos seus nutrientes e à perceção das limitantes que possam existir na parcela. Também será importante a georreferenciação, ou seja, cartografar através de mapas os dados sobre cada ponto da parcela para que se possam identificar as manchas existentes na parcela e perceber em que pontos há défice de *inputs* e que valor têm esses défices. Esta ferramenta será uma mais valia para a elaboração de cartas de prescrição, que dão a informação das necessidades de nutrientes e corretivos em cada ponto da parcela e, são aplicados com auxílio da tecnologia de taxa variável (VRT) que será explicada mais adiante.

O principal desafio do gestor agrícola é aumentar o máximo possível a produtividade, reduzindo a quantidade de *inputs* utilizados, e isto é possível com o auxílio da agricultura de precisão.

1.1 Objetivos

Os objetivos desta dissertação são:

- Avaliar e caracterizar a variabilidade espacial da fertilidade de uma parcela de milho;
- Diagnosticar fatores nutricionais limitantes à produtividade;
- Elaborar cartas de prescrição com base na variabilidade dos teores de nutrientes.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Agricultura de Precisão

2.1.1 Conceito

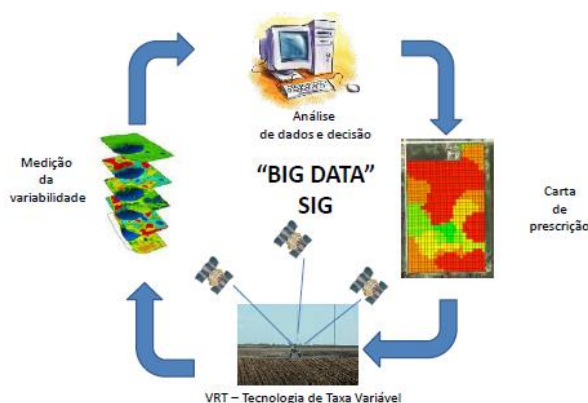
A agricultura de precisão é um sistema cultural que visa a gestão da variabilidade espacial e temporal das parcelas com o objetivo de melhorar o rendimento económico da atividade agrícola, através do aumento da produtividade e/ou qualidade, redução dos custos de produção e redução do impacto ambiental e o seu risco associado (Braga, 2014). Segundo Avillez (2015) a agricultura de precisão é uma forma de aplicar aquilo que se conhece, mas consumindo menos *inputs*, reduzindo e adaptando as quantidades necessárias de água, fitofármacos, adubos.

Este sistema permite que, em vez de se aplicar insumos (fertilizantes, água, fitossanitários, etc.) com base nas necessidades médias das parcelas, tratando-as como homogéneas, como acontece na agricultura convencional, estes sejam aplicados com base nas necessidades específicas em cada ponto da parcela (Capelli, 1999). Segundo Manzatto *et al.* (1999), o principal conceito da agricultura de precisão é aplicar os insumos no local, momento e quantidades corretos atendendo às necessidades de cada ponto da parcela pela sua variabilidade, tratando assim as parcelas como heterogéneas.

A agricultura de precisão é um processo contínuo e interativo de controlo e atuação no sentido de melhoria do processo de produção. É bastante indicada para explorações com um elevado nível de gestão e organização e nas quais os processos de gestão da rega, tratamentos fitossanitários e aplicação de fertilizantes estão já bastante otimizados. Neste sentido, este sistema é uma mais-valia para apuramento e afinação do sistema de produção através da otimização da variabilidade espacial das culturas (gestão intra-parcelar). (Braga, 2014)

Assim sendo, este processo deve seguir um conjunto de fases (figura 1), funcionando como um ciclo. Numa primeira fase é necessária uma medição da variabilidade espacial da cultura, ou seja, é importante a obtenção de uma carta de produtividade para as culturas arvenses, uma carta de NDVI (índice de densidade de vegetação) no caso das pastagens, fruticultura, vinha ou olival, uma carta de condutividade elétrica do solo. Em alguns casos é importante ter várias cartas de produtividade de anos consecutivos para melhor análise do comportamento da parcela (histórico da parcela). Na segunda fase procede-se à análise de dados e tomada de decisão. É nesta fase que se analisam as causas da variabilidade encontrada e se toma uma decisão em relação a elas, consoante os potenciais ganhos económicos através da atuação diferenciada. A terceira fase refere-se ao uso das cartas de prescrição para atuar

diferencialmente na densidade de sementeira, fertilização, gestão da rega, consoante as várias causas da variabilidade espacial. Por fim, na quarta fase, e no caso de necessidade de aplicação de fatores de produção como sementes, adubos, fitofármacos, e água para rega, procede-se ao uso da tecnologia de taxa variável (VRT), que irá ser explicada mais detalhadamente no ponto 2.1.2.4. Como é um processo cíclico, esta ultima fase é seguida da fase de medição da variabilidade uma vez mais, para que se possa ir aperfeiçoando todo o processo ao longo dos anos (Braga, 2014).



*Figura 1. Ciclo da agricultura de precisão.
Fonte: Braga (2016)*

2.1.2 Tecnologia

Há várias tecnologias associadas à agricultura de precisão. Estas são um apoio bastante importante para o produtor, pois têm como grande objetivo retratar a heterogeneidade existente em cada parcela. Dentro de um vasto leque destacam-se as mais importantes, o GPS; os SIG; a monitorização da produtividade das culturas; o VRT; a condutividade elétrica do solo e a deteção remota.

2.1.2.1 GPS

O GPS (Global Positioning System) é um sistema de posicionamento 3D baseado em satélites que permite determinar de forma instantânea a posição geográfica, bem como a velocidade e o horário de qualquer ponto à face da terra ou próximo dela independentemente das condições atmosféricas (Bernardi e Landim, 2002), sendo por isso o sistema de posicionamento mais usado nos nossos dias (Coelho e Silva, 2009).

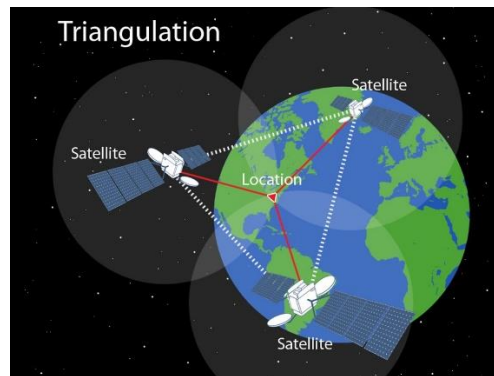
O GPS é alimentado por informações de um sistema de 24 satélites (NAVSTAR) que orbitam a terra 2 vezes ao dia (cada um leva 12 horas a orbitar a terra), em 6 planos diferentes e cada plano contém 4 satélites (figura 2). Sendo 24 satélites e como cada um orbita a terra durante

12 horas, é garantido que pelo menos 4 satélites estejam visíveis para cada ponto da superfície terrestre.



*Figura 2. Constelação de satélites que orbitam a terra, com 4 deles no mesmo plano.
Fonte: Huisman (2009)*

O posicionamento é feito pelos recetores de GPS que captam os sinais dos satélites, interpretam-nos e através de triangulações determinam a posição do utilizador (figura 3).



*Figura 3. Ilustração do posicionamento de um utilizador de GPS através de triangulação.
Fonte: National Geographic*

O GPS está na base de quase todos os sistemas de agricultura de precisão uma vez que para determinar a variabilidade espacial de uma parcela é necessário saber com precisão a posição geográfica de cada ponto usado na amostragem (Coelho e Silva, 2009).

2.1.2.2 Sistemas de Informação Geográfica

Segundo Aronoff (1989), o Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são conjuntos de funções, manuais ou automatizadas, usados para armazenamento e manipulação de informação georreferenciada. Para Ozemoy, Smith e Sicherman (1981), estes sistemas fornecem aos profissionais, avançadas capacidades de armazenamento, acesso, manipulação e visualização de informação georreferenciada. Cowen (1988) afirma ser um sistema de apoio à decisão que envolve integração de informação georreferenciada para resolver problemas.

Os SIG têm uma grande capacidade de relacionar camadas de dados através de atributos georreferenciados, o que lhe confere uma grande vantagem em relação aos sistemas de informação não geográficos. Esta capacidade de relacionar camadas de dados, permite combinar, analisar e, por fim, cartografar os resultados (Coelho e Silva, 2009).

Nos dados contidos na informação de um SIG podem-se distinguir dois componentes base: o componente geométrico, que diz respeito aos elementos geográficos e respetiva localização e o componente alfanumérico que se refere às características descritivas desses elementos (Coelho *et al.*, 2004). Do cruzamento destes dois componentes resulta uma camada de informação que surge dentro do SIG e que representa uma determinada natureza de informação, na qual as diversas camadas estão armazenadas em separado e independentes (figura 4).



Figura 4. Ilustração das camadas de informação de um SIG
Fonte: Adaptado de ArcGis

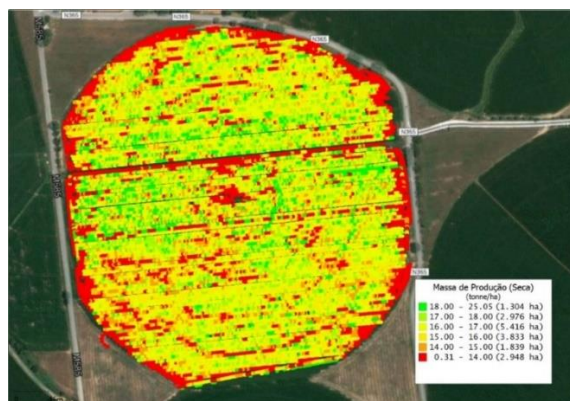
2.1.2.3 Monitores de produtividade

A medição da produtividade das culturas é feita em tempo real através de monitores que estimam a variação espacial da produção alcançada pela cultura, e quando conjugados com tecnologia GPS permitem apresentar os dados através de cartas. As cartas de produtividade (figura 5) são uma ferramenta bastante importante em AP porque permitem observar a variação espacial da produtividade de uma cultura numa parcela.

A obtenção e análise destes mapas é o primeiro grande passo para a implementação de um sistema de AP, pois permite ao agricultor identificar problemas associados à variabilidade da produtividade dentro de uma parcela. Não obstante, é preciso ter em conta que a agricultura depende de uma imensidade de fatores que podem ser completamente distintos de um ano para o outro (ex: condições climáticas). Por isso recomenda-se uma recolha de informação de vários anos (histórico), e uma análise detalhada de outras variáveis que possam influenciar o crescimento cultural, ou seja, por si só as cartas de produtividade são por vezes uma grande

ajuda à compreensão da variabilidade da produtividade intra-parcelar, mas é importante não descartar a análise de outros fatores (Coelho e Silva, 2009).

A informação obtida pelos monitores de produtividade, quando inserida em SIG, gera um importante auxílio ao VRT para as próximas opções culturais, com o grande objetivo de reduzir a variabilidade espacial e tornar cada parcela homogênea.



*Figura 5. Ilustração de um mapa de produtividade na Quinta da Cholda.
Fonte: autor*

2.1.2.4 VRT – Tecnologia de taxa variável

Segundo Coelho e Silva (2009), a VRT consiste num conjunto de tecnologias aptas para fornecer, consoante a informação recolhida de cada ponto da parcela, aplicações diferenciadas dos fatores de produção necessários ao crescimento cultural, tais como, sementes, adubos, fitofármacos e água para rega. Para podermos aplicar diferencialmente os fatores de produção através do VRT é necessária uma análise prévia da variabilidade da parcela, apurada através dos monitores de produtividade e consolidada com a conjugação das diferentes tecnologias anteriormente explicadas (GPS e SIG).

Existem dois métodos de aplicação diferenciada, os baseados em mapas, nos quais as taxas de aplicação variam de acordo com a informação recolhida por um SIG, consoante a variabilidade da parcela, sendo por isso essencial o sistema de GPS para que o SIG identifique o ponto da parcela onde se encontra e assim poder ajustar a taxa de aplicação; e os baseados em sensores, os quais avaliam as condições do solo ou das culturas em tempo real e vão aplicando em conformidade com a informação fornecida pelos mesmos, não sendo por isso necessário qualquer sistema GPS (Coelho e Silva, 2009).

Por outro lado, a VRT é dependente de outra tecnologia que controle as taxas de aplicação dos fatores de produção, os controladores. Estes são microprocessadores que a partir da informação fornecida pelos sensores ou pelo SIG (conforme o método de aplicação) são capazes de calcular a quantidade necessária de um determinado fator de produção, por

unidade de área com o objetivo de otimizar a aplicação do fator de produção. O resultado destes cálculos é transmitido pelos controladores aos mecanismos que acionam e regulam a distribuição e fazem com que as taxas de aplicação variem consoante as necessidades em cada unidade de área (figura 6).

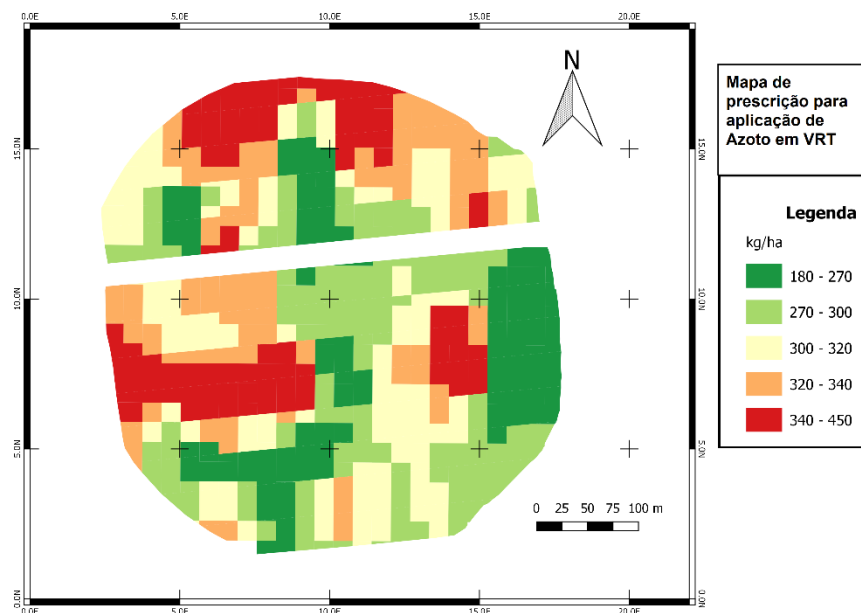


Figura 6. Exemplo de uma carta de prescrição para aplicação de fósforo em VRT.
Fonte: Autor

2.1.2.5 Análises de solos

No nosso país, existe uma grande variabilidade espacial de solos e perante este cenário é fundamental obter análises de solo, mesmo em pequenas parcelas (Coelho e Silva, 2009).

A análise de solos é um elemento essencial para conhecer as suas características físicas e químicas que afetam a nutrição de uma cultura. As condições físicas do solo, principalmente a textura, informam-nos sobre os aspetos importantes relacionados com a mobilidade da água e a dinâmica dos nutrientes. A análise química revela a sua riqueza em nutrientes do solo e dá-nos uma ideia sobre os elementos que estão na forma assimilável pela planta e também sobre as características que são desfavoráveis ou limitantes para o desenvolvimento da cultura.

É importante fazer o levantamento de variáveis como a fertilidade, obtendo o teor dos principais nutrientes existentes no solo (macronutrientes e micronutrientes), e o pH, que está relacionado com a disponibilidade de nutrientes usados pelas plantas (Coelho e Silva, 2009).

As características do solo como o teor de matéria orgânica, a textura (% de limo, areia e argila), a profundidade, a capacidade de armazenamento de água (relacionada com a textura), a permeabilidade, a drenagem, a compactação e a capacidade de troca catiónica são também

bastante importantes para perceber em que condições crescem e se desenvolvem as culturas (Coelho e Silva, 2009).

2.1.2.6 Detecção remota

A detecção remota só foi considerada uma componente da agricultura de precisão a partir do momento em que foi lançado o primeiro satélite destinado à recolha de imagens para uso civil, o LANDSAT 1, em 1972 (Coelho e Silva, 2009). Desde aí a disponibilização de imagens de satélite tem vindo a ser uma ferramenta fundamental para o melhoramento da agricultura de precisão.

Detecção remota significa, de uma forma genérica, a técnica para obter informação de objetos através de instrumentos que não estejam em contacto físico com esses objetos investigados (Avery e Berlin, 1992). Segundo Coelho e Silva (2009), a detecção remota, no contexto da cartografia, é um processo de recolha de informação de áreas e objetos próximos ou sobre a superfície terrestre, por um sensor de radiação eletromagnética colocado acima da mesma superfície terrestre. Para Ramirez *et al.* (2010), a detecção remota permite a recolha de informações úteis para acompanhamento e tomada de decisão na gestão das culturas, já que possibilita a identificação das áreas agrícolas e a sua evolução.

Já Braga (2016) define a detecção remota como o conjunto de técnicas para obtenção da refletância sobre um objeto por um sensor que não está em contato físico com o objeto. A refletância mede a razão entre o fluxo de radiação eletromagnética incidente e o refletido.

A informação pode ser obtida através de vários instrumentos, entre eles, satélites, *drones*, aviões e sensores de proximidade (figura 7).

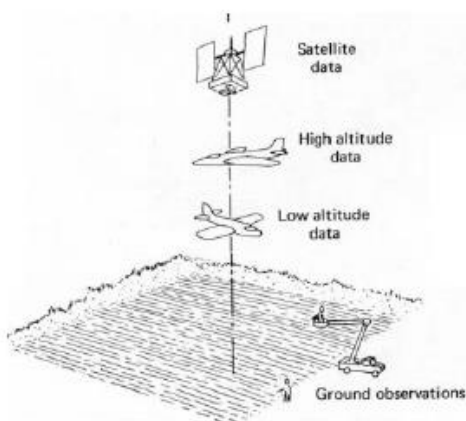


Figura 7. Instrumentos de obtenção de informação no âmbito da detecção remota.
Fonte: Braga (2016)

Dentro das inúmeras aplicações da detecção remota usadas como auxílio na gestão agrícola, destacam-se os índices vegetativos, tais como o NDVI (Normalized Difference Vegetative Index ou índice de vegetação), o PCD (Plant Cell Density) e o PVR (Photosintetic Vigor Ratio).

De todo o espectro eletromagnético (figura 8), só um pequeno intervalo de comprimentos de onda é usado em detecção remota e pode ser dividido em 3 bandas espectrais (Tristany, 2010):

- Visível (0,4 µm - 0,7 µm): de entre as 7 componentes do visível (do violeta ao vermelho), as 3 mais usadas em detecção remota são o RGB (Red, Green, Blue), ou seja, o azul (0.4 µm a 0.5 µm), verde (0.5 µm a 0.6 µm) e o vermelho (0.6 µm a 0.7 µm);
- Infravermelho (0,7 µm - 14 µm): dentro deste comprimento de onda destaca-se o IVP ou infravermelho próximo (0,7 µm - 1,4 µm);
- Microondas (1 mm - 1 m): são muito úteis em regiões com grande índice de nebulosidade.

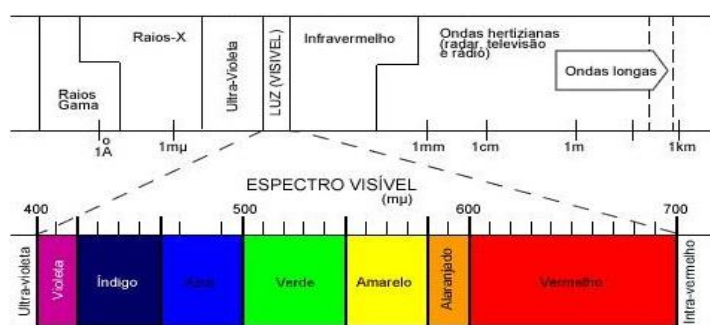


Figura 8. Ilustração do espectro eletromagnético.
Fonte: Adaptado de Climate Science Investigations

O índice de vegetação (NDVI) é um valor estimado a partir de dados obtidos através de detecção remota e mede a cobertura do solo por vegetação (Coelho e Silva, 2009). É um dado importante porque permite ao agricultor perceber se há algum *stress* na cultura, se o crescimento é homogêneo, ou seja, se as plantas estão todas na mesma fase de crescimento, entre outros. Tal como a maioria dos índices deste

tipo, o NDVI é calculado através da razão entre a refletância no vermelho e no IVP:

$$NDVI = \frac{IVP - Vermelho}{IVP + Vermelho}$$

O Plant Cell Density (PCD) é importante para a agricultura porque em alguns casos, como o milho, o NDVI satura e não é um dado fiável a partir de determinada fase do seu ciclo (floração), assim passa-se a usar o PCD. Este calcula-se a partir da fórmula:

$$PCD = \frac{IVP}{Vermelho}$$

O Photosintetic Vigor Ratio (PVR) só usa bandas do visível e calcula-se da seguinte forma:

$$PVR = \frac{Verde}{Vermelho}$$

2.2. A cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma espécie que pertence à família Poaceae. Há mais de 7000 anos que é cultivada em diversas partes do mundo, tendo sido provavelmente originário da América central. Na altura da colonização europeia do continente americano (século XV/XVI), o milho foi trazido para outras partes do mundo, principalmente para as zonas mais temperadas (Farnham *et al.*, 2003).

Este cereal tem inúmeras utilizações, tais como a silagem, os alimentos compostos para animais, indústria alimentar (farinhas, amidos), bem como produção de energias renováveis (bioetanol e biogás) e materiais biodegradáveis (bioplásticos e fibras).

Devido à sua morfologia e fisiologia, tem uma grande adaptabilidade a um vasto leque de ambientes, o que permite que hoje em dia o milho possa ser produzido desde o nível do mar até altitudes de 3600 m e desde o Equador até ao limite da zona temperada, podendo ser encontrando em regiões tropicais, subtropicais e temperadas (Farnham *et al.*, 2003).

2.2.1 Fases desenvolvimento da cultura do milho

O ciclo do milho contempla 2 principais fases: fase vegetativa (V) e fase reprodutiva (R) (figura 9).

A fase vegetativa inicia-se na emergência das plantas (VE) e termina no embandeiramento (VT). É nesta fase que a planta começa a formar e a definir a quantidade de folhas e espigas que eventualmente irá produzir, a estabelecer o número máximo de grãos, o número de fileiras de grãos e o tamanho da espiga, ou seja, define o seu potencial produtivo. Por isso, é importante que na fase vegetativa não haja qualquer stress, quer por competição de plantas daninhas, quer por excesso ou défice de água, que possa afetar e reduzir a produção potencial das plantas.

A fase reprodutiva inicia-se no florescimento e polinização (R1) e termina na maturação fisiológica (R6). Nesta fase, define-se o número de óvulos que serão fertilizados e que darão grãos e a consequente acumulação de matéria seca nos grãos. Por isso, é imprescindível na fase reprodutiva que haja temperatura e humidade adequadas à fertilização e manutenção

dos óvulos, não haja falta de azoto e fósforo, nem stress hídrico, uma vez que o stress afeta a fotossíntese e faz com que a produção fique bastante comprometida.

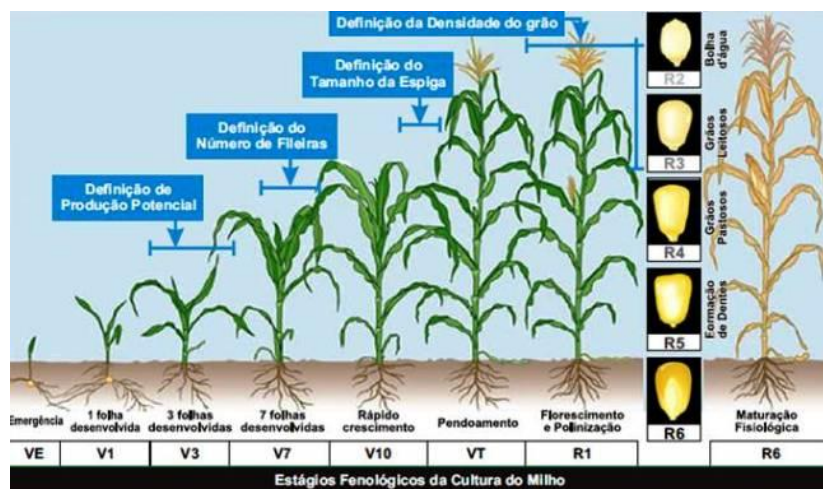


Figura 9. Fenologia do milho: estados de desenvolvimento da cultura.
Fonte: Adaptado de Fancelli (1986)

2.2.2 Necessidades nutricionais

Os nutrientes requeridos por qualquer planta estão divididos em macronutrientes principais, os absorvidos em maior quantidade; macronutrientes secundários, absorvidos em menor quantidade que os primeiros, mas indispensáveis às culturas e micronutrientes, que são absorvidos em menor quantidade (Barros e Calado, 2014).

2.2.2.1 Macronutrientes principais

Os macronutrientes principais são o azoto (N), o fósforo (P) e o potássio (K).

O azoto é fundamental para se obter a produção potencial de milho. Aumenta o teor de proteína do grão e melhora a digestibilidade do milho forrageiro (ADP). É um nutriente muito móvel no solo e por isso é difícil a sua gestão, sendo por isso quase impossível determinar com rigor a quantidade de N que um solo pode fornecer a uma cultura (ANPROMIS).

Para calcular o balanço do azoto no solo é necessário calcular as suas saídas e as suas entradas. As entradas podem ser provenientes da mineralização da matéria orgânica e dos resíduos da cultura anterior e ainda da fixação simbiótica da cultura precedente, caso esta seja leguminosa.

As saídas podem ocorrer de duas formas: através da extração da cultura e das perdas por lavagem. As perdas por lavagem são resultado da precipitação, quando a cultura é de sequeiro ou da rega, quando a cultura é de regadio. Estas perdas podem também depender do tipo de solo e da forma química em que o azoto é aplicado.

Para calcular a extração da cultura em azoto é necessário fazer uma estimativa de vários parâmetros: produtividade esperada, consoante as características da parcela, variedade da planta, disponibilidade hídrica e potencialidade climática da região (Barros e Calado, 2014).

Assim sendo, é possível calcular a adubação azotada:

$$\begin{aligned} \text{Adubação (N)} = & \textbf{Saídas} \text{ (extração da cultura + perdas)} \\ & - \textbf{Entradas} \text{ (matéria orgânica do solo + resíduos da cultura precedente} \\ & + \text{N proveniente da fixação simbiótica das leguminosas)} \end{aligned}$$

O ritmo e as necessidades de absorção de azoto variam ao longo do seu ciclo. Até as 8-10 folhas, o milho absorve menos de 10% do total absorvido porque as raízes ainda estão pouco desenvolvidas e o solo liberta pouco N devido às baixas temperaturas e, consequentemente à baixa mineralização do nutriente. Entre as 10 folhas e o escurecimento dos estigmas, a absorção de N é muito intensa, o milho absorve cerca de 60-70% do total absorvido. Esta fase ocorre na primavera-verão, altura em que a mineralização do N é maior devido às altas temperaturas, então o milho beneficia desta situação. Durante o enchimento do grão, a absorção volta a ser mais baixa, o milho absorve cerca de 20-30% do total absorvido (ANPROMIS).

Segundo a ANPROMIS, as necessidades médias em azoto no milho grão são as seguintes:

- 22 kg de azoto por 1 ton de grão (a 14,5% de humidade), para produtividades inferiores a 10 ton/ha;
- 21 kg de azoto por 1 ton de grão (a 14,5% de humidade), para produtividades entre 10 e 12 ton/ha;
- 20 kg de azoto por 1 ton de grão (a 14,5% de humidade), para produtividades superiores a 12 ton/ha.

O fósforo é um nutriente que ajuda ao desenvolvimento radicular, aumenta a resistência dos caules e influencia de forma positiva a floração, fecundação, formação e maturação do grão, já que cerca de 77-86% do total absorvido deste nutriente é translocado para o grão (Barros e Calado, 2014). O teor de extração é cerca de 3,6 kg de fósforo por tonelada de grão produzida (Coelho, 1995).

É um nutriente pouco solúvel e pode ser retido facilmente no solo, ficando assim indisponível para as plantas. Quando o pH do solo é ácido ou alcalino o ião fósforo tem tendência a ligar-se a outros nutrientes, ficando indisponível às plantas porque são pouco solúveis e dificilmente são absorvidos pelas mesmas. Por estas razões, o seu coeficiente de utilização é de cerca de 20%. Todo o fósforo necessário à cultura é aplicado de fundo ou à sementeira.

O potássio é o segundo nutriente mais absorvido pelo milho, depois do azoto, já que aumenta a taxa fotossintética das plantas e a resistência das mesmas à seca.

É absorvido sob a forma de íon K^+ e tem maior tendência a perder-se por lavagem que o P. Tem facilidade em ligar-se às argilas, ficando assim indisponível às plantas. Por estas razões, o seu coeficiente de utilização é de cerca de 40%. Coelho (1995) refere que o seu teor de extração é de cerca de 17 kg de potássio por tonelada de grão produzida.

Tal como o fósforo, todo o potássio necessário à cultura é aplicado de fundo ou à sementeira.

2.2.2.2 Macronutrientes secundários

Os macronutrientes secundários, cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), são também bastante importantes e indispensáveis às culturas.

Para aplicar os dois primeiros, Ca e Mg, e com o intuito de corrigir a acidez de um solo, faz-se uma calagem, que ajuda a neutralizar elementos tóxicos (alumínio e manganês), eleva o pH do solo, aumenta a disponibilidade de nutrientes para as plantas e melhora o ambiente radicular, favorecendo o desenvolvimento de micorrizas. A calagem só com cálcio leva a um desequilíbrio de cálcio e do magnésio, que prejudica o crescimento das plantas, por isso deve-se ir adicionando doses de calcário com magnésio, sendo que este último é fundamental para o crescimento das plantas.

A extração de enxofre por parte das plantas é baixa, mas cada vez mais este tem sido um nutriente que tem requerido especial atenção por parte dos produtores de milho. Estudos recentes levam a querer que este nutriente pode ser um limitante à produtividade, uma vez que as necessidades do mesmo eram supridas em adubos com macronutrientes principais contendo enxofre, sendo assim posta de parte a aplicação e a importância do mesmo.

Dos totais absorvidos pela cultura, são translocados para o grão 3-7% de Ca, 47-69% Mg e cerca de 60% de S.

Quadro 1. Extração média de nutrientes pela cultura do milho em kg/ha.

	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
Extrações (kg/ha)	160-280	60-110	110-230	40-80	50-110	15-20	0,1-0,2	0,1	1,0-2,1	0,34-0,75	0,005-0,009	0,38-0,70

Fonte: Adaptado de ADP Fertilizantes

2.2.2.3 Micronutrientes

Os micronutrientes são os nutrientes absorvidos em menor quantidade nas culturas, mas não deixam de ser importantes porque podem ser limitantes à produção quando estão em défice ou tóxicos quando estão em excesso. Os micronutrientes mais importantes na cultura do milho

são o ferro (Fe), o manganês (Mn), o zinco (Zn), o boro (Bo), o cobre (Cu) e o molibdênio (Mo). No quadro 2 estão ilustrados os valores de extração destes micronutrientes por tonelada de milho produzida.

Quadro 2. Extração de micronutrientes por tonelada de milho produzida.

Micronutrientes	Extração (g/ton)
Boro	19
Ferro	233
Manganês	38
Cobre	12
Zinco	44
Molibdênio	1

Fonte: Adaptado de Coelho (2006)

A grande preocupação dos agricultores é aumentar a produtividade das culturas e os micronutrientes têm um papel fundamental nesse sentido. A cultura do milho apresenta alta sensibilidade ao déficit de zinco, média à de ferro, cobre e manganês e baixa à de molibdênio e boro (Barros e Calado, 2014).

O quadro 3 mostra os valores foliares de macro e micronutrientes adequados à cultura do milho.

Quadro 3. Teores foliares de nutrientes considerados adequados à cultura do milho.

Macronutrientes	Teor (%)	Micronutrientes	Teor (ppm)
Azoto	2,75 - 3,25	Ferro	50 - 250
Fósforo	0,19 - 0,35	Manganês	42 - 150
Potássio	1,75 - 2,97	Zinco	15 - 50
Cálcio	0,23 - 0,4	Boro	15 - 20
Magnésio	0,15 - 0,4	Cobre	6 - 20
Enxofre	0,15 - 0,21	Molibdênio	0,15 - 0,2

Fonte: Adaptado de Coelho (2006)

2.3. Condutividade elétrica aparente

Como foi anteriormente mencionado, a condutividade elétrica aparente do solo (CEa) exprime a capacidade do solo em conduzir corrente elétrica, e é expressa em miliSiemens por metro (mS/m). É medida a partir da indução de uma corrente elétrica no solo (McCornick *et al.*, 2009).

A primeira aplicação de CEa na agricultura foi para a medição da salinidade do solo (quadro 4). A pesquisa foi realizada na década de 70 por Rhoades e uns colegas no USDA-ARS Salinity Laboratory em Riverside, Califórnia. A salinidade limita a absorção de água pelas plantas, reduzindo o potencial osmótico, tornando assim mais difícil a absorção de água pela planta.

Quadro 4. Classes de salinidade dos solos.

Condutividade elétrica (mS/m)	Classes de salinidade
0 - 200	Não salino
200 - 400	Muito pouco salino
400 - 800	Ligeiramente salino
800 - 1600	Moderadamente salino
> 1600	Muito salino

Fonte: Adaptado de USDA (1954)

Saber a variabilidade das características do solo numa exploração agrícola é fundamental para determinar a vantagem potencial da adoção de técnicas de AP (King *et al.*, 2005).

O uso combinado de geoestatística e de diferentes tipos de estratégias de amostragem do solo é bastante usada no estudo espacial dos atributos do solo (Triantafilis e Lesch, 2005), no entanto, estes métodos revelam-se morosos e caros (Aimrun *et al.*, 2009), o que os torna de certa forma inviáveis no contexto da AP (Peralta e Costa, 2013). Segundo Serrano (2010), a gestão diferenciada do solo e das culturas requer meios rápidos e de baixo custo para georreferenciar as propriedades do solo com impacto na produtividade das culturas. Para além disso, os levantamentos tradicionais de solo fornecem apenas uma compreensão geral da variação do solo que influencia a produtividade das culturas e não são suficientemente detalhados para fornecer informações para recomendações dentro do campo (Long, 1998).

Para Mertens *et al.* (2008) a medição da condutividade elétrica do solo é uma abordagem bastante rápida e económica para estimar os indicadores de qualidade do solo e é uma ajuda preciosa para a AP já que é possível relacionar a CEa do solo com as propriedades do mesmo.

A medição da CEa do solo é uma das ferramentas mais usadas no estudo edáfico, no espaço e no tempo (Doolittle e Brevik, 2014), podendo ser usada como diagnóstico para estimar as propriedades do solo e promover a amostragem inteligente do mesmo (Sudduth *et al.*, 2005). Johnson *et al.* (2005) revela que a CEa pode ser usada para identificar gradientes de fertilidade do solo porque há relação significativa entre a CEa, as características do solo e a produtividade das culturas.

Várias referências indicam que os valores da CEa se encontram relacionados com as propriedades do solo, parâmetros de fertilidade e com a produtividade das culturas, por isso, a monitorização desta, em tempo real, pode ser uma ferramenta muito atrativa em AP. Friedman (2005) diz que a CEa pode ser influenciada por diferentes fatores, tais como a salinidade, a textura, a mineralogia, o teor de água, a densidade aparente e a temperatura. Em geral, a magnitude e a heterogeneidade espacial da CEa num terreno são dominadas por

um ou dois desses fatores, que variam de um campo para outro, tornando a interpretação das medições de CEa altamente específicas do local (Johnson *et al.*, 2003).

A variação dos níveis de nutrientes no solo leva, no caso da aplicação uniforme de fertilizantes, à aplicação excessiva nalguns locais e aplicação abaixo do recomendado noutros (Mallarino e Wittery, 2004), de que resultam perdas agronómicas e económicas diretas que conduzem a um acréscimo de poluição ambiental (Maleki *et al.*, 2007; McCormick *et al.*, 2009). Neste contexto justifica-se a implementação de metodologia que permita identificar e gerir zonas das parcelas com o objetivo de racionalizar os fatores de produção, criando assim uma gestão diferenciada. O mapeamento da condutividade elétrica pode então ser usado para delinear essas zonas de gestão diferenciada (Stafford, 2006) e é uma base para o uso de tecnologias que permitem a aplicação de nutrientes adequadas a cada local do terreno.

A condutividade elétrica tanto pode ser medida no campo, como em laboratório. As medições no campo são feitas em tempo real através de alguns equipamentos móveis, entre os quais se destacam o sensor por indução EM38 (Kitchen *et al.*, 1999) e o sensor de medição por contacto Veris (Lund *et al.*, 2001).

2.3.1 Sensor EM38

O sensor EM38 mede a CEa através da indução eletromagnética, de acordo com a profundidade, através de leituras múltiplas (Rhoades e Corwin, 1991). É um método não invasivo pois a leitura da condutividade é efetuada sem perturbar as características do solo.

Este aparelho induz corrente elétrica no solo e a corrente em cada ciclo é proporcional à condutividade do solo nessa camada (Geonics, 1999). Funciona com duas bobinas nas pontas, uma de transmissão, outra de receção com espaçamento de 1 m e a uma frequência de 14.5 kHz.

Este aparelho pode medir duas profundidades distintas (figura 10), 1.5 m quando posicionado na direção do dipolo vertical e 0.75 m quando posicionado na direção do dipolo horizontal (Geonics, 1999).

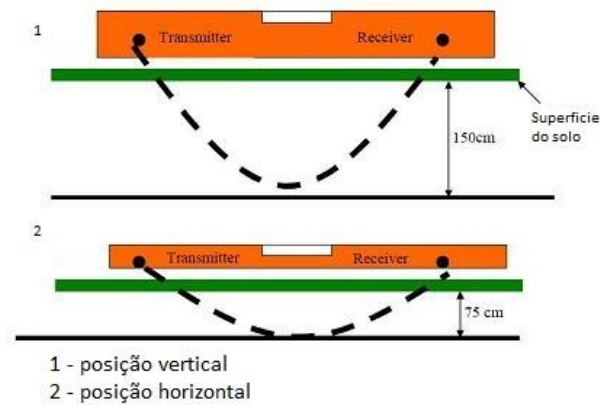


Figura 10. Ilustração do sensor EM38 quando posicionado vertical (1) e horizontalmente (2).
Fonte: Adaptado de Geonics

A figura 11 representa um esquema do funcionamento do sensor EM38 em diferentes profundidades de solo.

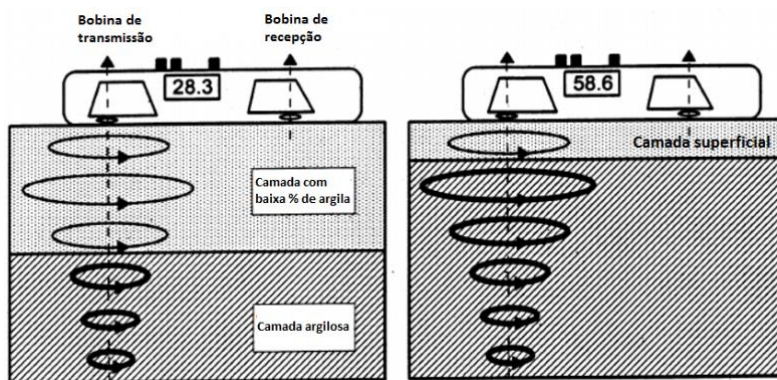


Figura 11. Ilustração do funcionamento do sensor Geonics EM38
Fonte: Adaptado de Sudduth et al. (2001)

2.3.2 Sensor Veris

O sensor Veris usa o método de resistividade elétrica que tem como base o uso de reatores como elétrodos para fazer contacto com o solo e medir a condutividade elétrica (Veris Technologies, EUA).

É constituído por uma barra com dois a três pares de elétrodos, um par transmite corrente elétrica ao solo (elétrodo de transmissão), enquanto os outros (elétrodos de receção) medem a tensão entre eles (figura 12).

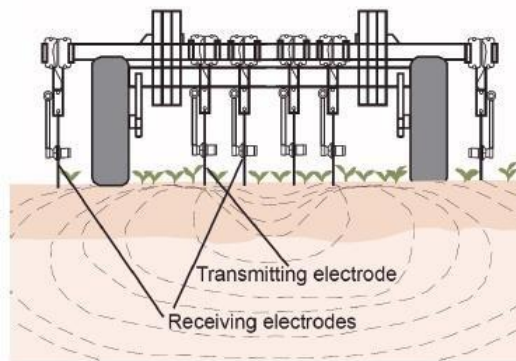


Figura 12. Ilustração do funcionamento de um sensor de contacto para medição da CEE do solo.
Fonte: Veris Technologies

É um tipo de sensor mais vantajoso na ótica da AP, uma vez que permite mapear grandes áreas em pouco tempo, e há facilidade em alterar a profundidade e volume de solo a analisar, simplesmente alterando a distância entre elétrodos.

A desvantagem deste sistema é que requer bom contacto com o solo, para além de que é uma máquina mais volumosa do que as indutivas e por isso não pode ser usada em pequenas parcelas (Veris Technology, EUA).

2.4. Amostragem de solo

Desde sempre, o grande objetivo da obtenção de amostras de solo foi determinar a composição média de nutrientes de uma parcela (Ferguson *et al.*, 2012).

Em agricultura de precisão, como tem sido referido, é essencial o conhecimento detalhado das características da parcela, para uma boa tomada de decisão. Para isso, é importante fazer análises de solo, que possam evidenciar a composição nutricional das parcelas e posteriormente fazer uma recomendação de fertilização. Em AP, os objetivos da amostragem de terras são os mesmos da agricultura convencional, mas com algumas nuances: em vez de se determinarem as médias nutricionais das parcelas, há necessidade de saber os valores nutricionais de pontos da parcela e relacioná-los com outras propriedades do terreno, como o tipo de solo, a CEE, a topografia, entre outros.

Para fazer análises de solo é importante recolher um número adequado de amostras que permitam obter os níveis nutricionais com precisão e as mesmas devem ser colhidas com profundidade suficiente para incluir nutrientes móveis e não móveis (Ferguson *et al.*, 2012).

Para a recolha das amostras, tem de haver uma escolha prévia dos locais onde se pretende recolher as amostras, os pontos de amostragem. Há duas formas distintas de escolher pontos de amostragem:

- Grid sampling;

- Smart sampling.

O grid sampling, ou amostragem por grade, é um método sistemático, no qual se sobrepõe uma grade quadrada ou retangular numa imagem ou um mapa da parcela, dividindo-a em várias células (Wollenhaupt e Wolkowski, 1994). A amostra é então recolhida do meio de cada célula ou nos vértices de interseção de cada célula. Para uma maior representatividade da amostra, devem-se recolher amostras num raio de 3 metros do ponto (figura 13).

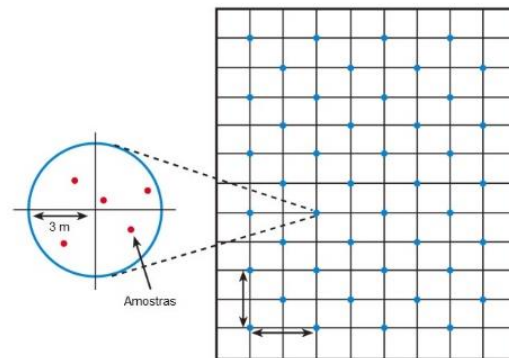


Figura 13. Ilustração da amostragem por grade (grid sampling).
Fonte: Ferguson et al. (2012)

Segundo Ferguson e Hergert (2012), uma amostragem por grade bem executada, pode ser um recurso valioso durante 10 a 20 anos para a matéria orgânica do solo e capacidade de troca catiónica, 5 a 10 anos para o pH e 4 a 5 anos para o fósforo, potássio e zinco. Isto depende da densidade de amostragem, a qual os mesmos autores defendem que 2 amostras por ha será adequado. O grande entrave deste tipo de amostragem é o custo de análise de cada amostra, é bastante dispendioso.

O smart sampling, ou amostragem inteligente, é um método onde os pontos de amostragem podem ser definidos a partir de cartas de produtividade ou de CEa, porque a partir destas ferramentas é possível perceber a variabilidade existente numa parcela e em que locais a amostragem pode ajudar a interpretar essa variabilidade. Para isso é também importante que o gestor agrícola tenha o máximo conhecimento acerca das características da parcela e onde possa haver locais onde o solo possa ser limitante à produção.

Na figura 14 é ilustrado um exemplo de amostragem inteligente, no qual se usou uma carta de produtividade para marcar os pontos de amostragem.

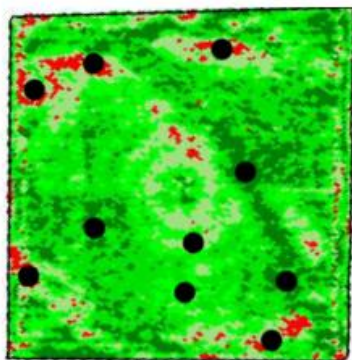


Figura 14. Ilustração da amostragem inteligente.
Fonte: Adaptado de Braga (2016)

2.5. Interpolação espacial

A interpolação espacial é um método usado para estipular valores de células que não foram usadas como pontos de amostragem, usando dados obtidos em pontos adjacentes (Wackernagel, 1998).

Os métodos de interpolação podem-se dividir em duas principais categorias:

- Determinística como é o caso do IDW (inverse distance weight)
- Geoestatística como é o caso do *kriging*.

2.5.1 *Inverse Distance Weight*

A interpolação IDW implementa a suposição de que os objetos que estão próximos uns dos outros são mais parecidos do que aqueles que estão mais distantes (Ashraf *et al.* 1997). Assim sendo, neste método assume-se que cada ponto medido tem uma influência local que diminui com a distância. Para estipular um valor de uma célula não medida, são usados os valores medidos em torno do local de previsão (Nalder e Wein 1998). Por esta lógica, valores medidos que estejam mais próximos do valor previsto têm maior influência sobre este (Johnston *et al.* 2001). Este método está bastante dependente da quantidade e dispersão de amostras na parcela.

2.5.2 *Kriging*

As técnicas geoestatísticas quantificam a autocorrelação (dependência espacial) entre os pontos medidos e explicam a configuração espacial dos pontos de amostragem em torno do local de previsão (Borga e Vizzaccaro 1997, Campling *et al.* 2001).

Ao longo das últimas décadas, o *kriging* tornou-se uma ferramenta fundamental na geoestatística (Caruso e Quarta, 1998). Este método forma pesos dos valores medidos circundantes para prever valores em locais não medidos. Tal como acontece com a

interpolação IDW, os valores medidos mais próximos têm maior influência, mas os pesos de *kriging* são mais sofisticados. Enquanto o IDW baseia-se na distância, os valores obtidos pelo *kriging* provêm de um semivariograma desenvolvido a partir da estrutura espacial dos dados. Para criar um mapa contínuo, são feitas previsões para locais na área de estudo com base no semivariograma e na disposição espacial de valores próximos que tenham sido medidos (Collins 1996, Johnston *et al.*, 2001).

A denominação *kriging* foi empregue pela primeira vez em 1965 por Georges Matheron em homenagem aos trabalhos pioneiros de Danie Krige (realizados em 1951). Em agricultura, David Mulla foi o primeiro a usar a geoestatística, no ano de 1988, ao tentar mapear o padrão de P e K no solo (Oliver, 2010).

Há variados interpoladores de *kriging*. Os mais simples e usados são o *simple kriging*, no qual se considera que a média do parâmetro em estudo é constante e é conhecida e o *ordinary kriging*, no qual se considera que a média do parâmetro em estudo é constante, mas não é conhecida, já que considera as nuances locais da média, ou seja, considera-se que a média varia localmente.

Destes dois vou dar mais enfoque ao *ordinary kriging* que é o estimador geoestatístico que foi usado neste trabalho. Neste método, calcula-se o valor da variável de uma dada célula (não medida) a partir dos valores dos pontos à volta (que foram medidos) e de um modelo de variograma para essa variável (Nalder e Wein 1998).

O variograma mostra o grau de dependência espacial entre amostras, ou seja, a distância máxima em que os valores ainda apresentam correlação. Mede o grau de semelhança entre amostras vizinhas, porque é esperado que quanto mais próximas temporal e espacialmente estiverem essas amostras, maior será a semelhança entre elas, menor a variância e maior a correlação espacial e temporal. O modelo matemático ajustado ao variograma é estimado pela equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 \times N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

Onde:

$\gamma(h)$ – variância estimada

$N(h)$ - número de pares de pontos separados pela distância h .

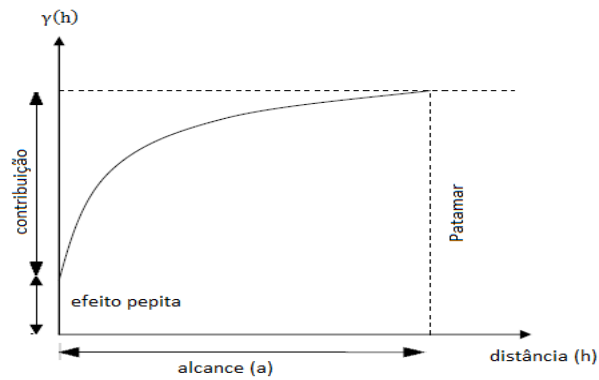


Figura 15. Variograma
 Fonte: Adaptado de Erarslan (2012)

Na figura 15 está representado o variograma com os seguintes parâmetros:

- Alcance (sill) – é a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;
- Efeito pepita (nugget) – por definição é igual a zero, mas pode não passar na origem, quando assim é, chama-se de efeito pepita e representa a quantidade de erro não espacialmente autocorrelacionado;
- Patamar (range) – é o valor do variograma correspondente ao seu alcance (a). Até este valor é considerado que os pontos mais próximos entre si provavelmente são mais semelhantes que os pontos mais afastados, e a partir deste valor em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, ou seja, não têm influência uns sobre os outros.

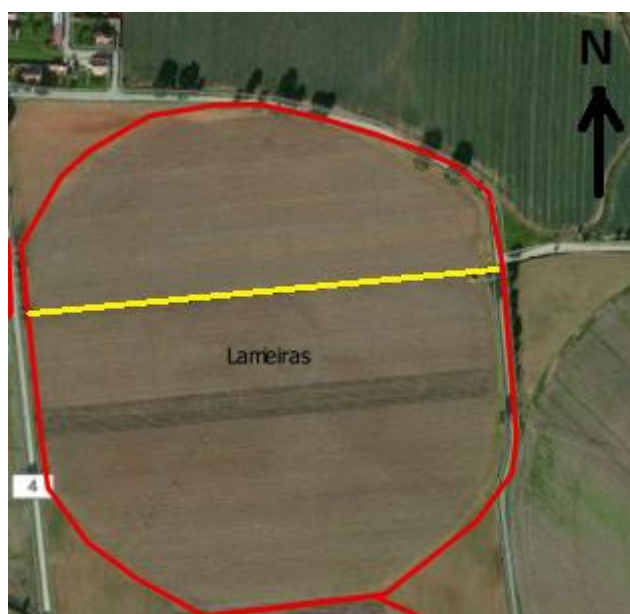
3. Material e métodos

3.1. Caracterização da área em estudo

3.1.1 Localização da parcela

A parcela em estudo está localizada na Freguesia de Azinhaga, no concelho da Golegã, tendo as coordenadas 39°21'N e 8°33'O, altitude de 13 metros e declives muito reduzidos (figura16).

Os ensaios foram feitos na parcela representada na figura 16, denominada Lameiras, e que tem uma área de 19,5 ha. Nesta parcela pratica-se o cultivo intensivo tradicional de milho. A parcela Lameiras é ainda atravessada por um pequeno curso de um rio delineado a amarelo.



*Figura 16. Ilustração da parcela Lameiras
Fonte: autor*

A área em estudo insere-se numa exploração que desenvolve a sua atividade em cerealicultura (principalmente milho) e é feita pela empresa João José Andrade Coimbra, Herdeiros na Quinta da Cholda.

A parcela em causa é, ano após ano, submetida a ensaios e testes em Agricultura de Precisão. Estes ensaios e experimentações inserem-se num projeto chamado “Smartcrop” (<http://www.smartcrop.info/>). É um projeto que visa a recolha, tratamento e análise de dados, que ajudará o agricultor na tomada de decisão, fazendo com que este possa melhor gerir a sua parcela, conforme as necessidades da cultura naquele momento, permitindo assim um ganho de competitividade.

Os objetivos principais deste projeto são: melhorar o processo de tomada de decisão na gestão cultural, melhorar a eficiência dos fatores de produção e energia elétrica usados, bem como aumentar a rentabilidade da atividade agrícola.

Concretamente, este projeto tem como metas principais: desenvolvimento de uma plataforma de gestão integrada de informação das operações culturais para auxílio ao produtor; desenvolvimento de mapas de índices de vegetação em alturas críticas do ciclo vegetativo, bem como mapas de produtividade para que se possam identificar relações espaciais entre a produtividade obtida e os fatores de variabilidade espacial; otimização do sistema de aplicação diferenciada (VRT); modelação das necessidades de rega a partir de registos de estações meteorológicas e previsão meteorológica, bem como programação da mesma em função das horas de menor custo energético.

Os principais parceiros deste projeto são as empresas Consulai, responsável pela elaboração e gestão do projeto; Hidrosoph, responsável pela gestão de rega do projeto; o Instituto Superior de Agronomia, uma das principais instituições de ensino superior do complexo agro-florestal a nível nacional e a empresa João José Coimbra, Herdeiros, a entidade gestora do projeto, com grande reconhecimento no setor já que é exemplo de excelência na produção de milho nacional.

3.1.2 Caracterização climática

Os dados climáticos usados para a zona onde se realizou este trabalho foram obtidos da estação meteorológica de Santarém, por ser a mais estação mais próxima do local (a cerca de 20 km) (anexos 1 e 2).

De acordo com a classificação climática de Thornthwaite (1948), Santarém insere-se nas regiões que contém o clima sub-húmido seco (mesotérmico B4). Já pela classificação de Köppen (1928), este clima classifica-se como temperado por ser chuvoso e moderadamente quente com chuvas intensas no inverno (tipo Cs), e por apresentar valores de temperatura média do mês mais quente superiores a 22°C (figura 17), insere-se no sub-tipo Csa: mesotérmico húmido, com verão quente e seco e um inverno fresco e chuvoso.

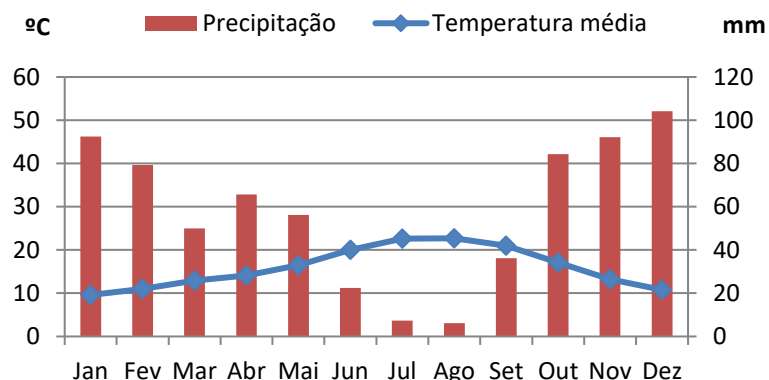


Figura 17. Diagrama ombrotérmico de Gaussen para Santarém, período de 1971 a 2000
Fonte: IPMA

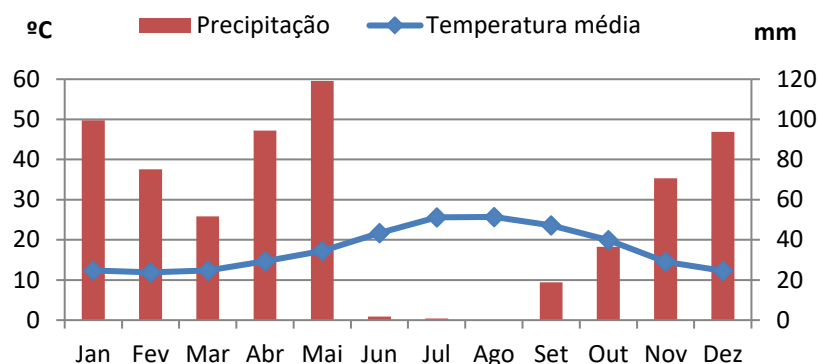


Figura 18. Diagrama ombrotérmico de Gaussen para Santarém em 2016
Fonte: IPMA

O diagrama ombrotérmico de Gaussen é usado para definir o período seco de uma determinada zona, que corresponde à mancha na qual a linha da temperatura é duas vezes superior à linha de precipitação.

Como se pode verificar nas figuras 17 e 18, o período de seca corresponde aos meses de junho a setembro.

O ano de 2016 foi bastante semelhante em valores de médias de temperatura em relação ao período de 1971 a 2000 (figuras 17 e 18). Nota-se, quando comparadas as duas figuras, que a curva de temperaturas é bastante idêntica nos dois casos. Contudo, o mesmo não se verifica, quando comparadas as precipitações dos anos referidos.

O ano de 2016 foi bastante atípico em termos de precipitações, contrariando as médias do período mais ancestral. Os meses em que se verificam grandes diferenças foram abril (94,4 mm em 2016 e 65,7 mm no período 1971-2000) e maio (119,1 mm em 2016 e 56,2 mm no período 1971-2000), e foram determinantes para não se poder iniciar a sementeira mais cedo

porque não era possível o solo atingir o ponto de sazão (quando o teor de humidade do solo se encontra abaixo da capacidade de campo e acima do limite inferior de plasticidade). Já nos meses de junho e setembro, verifica-se uma precipitação bastante inferior para o ano de 2016, que obrigou o produtor a aplicar mais água sob forma de rega à cultura. O mês de outubro geralmente coincide com a época de colheita, e no ano corrente a precipitação foi bastante inferior à do período de 1971-2000 como nos meses de junho e setembro. Contrariamente ao que acontece nestes meses, a baixa precipitação registada não constitui um problema, porque quando a colheita se aproxima, é favorável ao produtor que o solo tenha pouca quantidade de água, permitindo à cultura reduzir a humidade no grão, evitando o uso do secador durante muito tempo (é sempre necessário, mas quanto menor a humidade do grão quando é colhida, menos tempo é preciso) e possibilitando a entrada de máquinas agrícolas sem a dificuldade de mobilidade.

3.1.3 Caracterização edáfica

Segundo a carta de solos do SROA (1973), elaborada de acordo com a classificação dos Solos de Portugal (Cardoso, 1965), os solos da Golegã pertencem à ordem dos solos incipientes, subordem dos aluviossolos e grupo dos aluviossolos modernos.

A figura 19 ilustra os tipos de solo da parcela em estudo. É predominante a presença de aluviossolos modernos, mas é notória a presença de um aluviossolo antigo a atravessar a parcela.

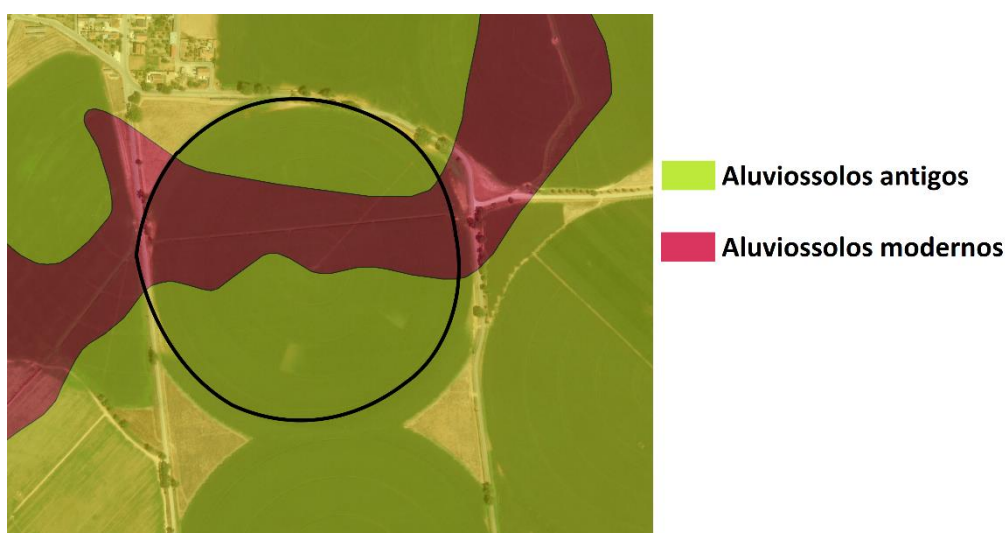


Figura 19. Carta de solos da parcela em estudo

Pela classificação de solos de Portugal, os aluviossolos são solos incipientes não hidromórficos constituídos por depósitos estratificados de aluviões, de características variadas, como solos profundos, de textura fina, uma presença da toalha freática mais ou

menos profunda e o seu pH é geralmente neutro (entre 6,5 e 7,5). Os aluviossolos modernos são aluviossolos que recebem, em geral, de tempos a tempos adições de sedimentos aluvionais.

De acordo com Figueira (1997), o campo da Golegã é constituído por aluviossolos modernos de textura ligeira calcários ou de textura mediana calcários. São solos não evoluídos, sem horizontes genéticos diferenciados, praticamente reduzidos ao material originário e constituídos por materiais detríticos minerais e orgânicos, transportados por águas fluviais, desde saibros e areias grossas às mais finas partículas de argila.

Estes aluviossolos, de acordo com a classificação da FAO (IUSS Working Group WRB, 2006) são considerados Fluvissolos.

3.1.4 Produtividade 2016

A carta de produtividade de 2016 (figura 20) apresenta valores de quantidade de milho em ton/ha medida em cada ponto da parcela.

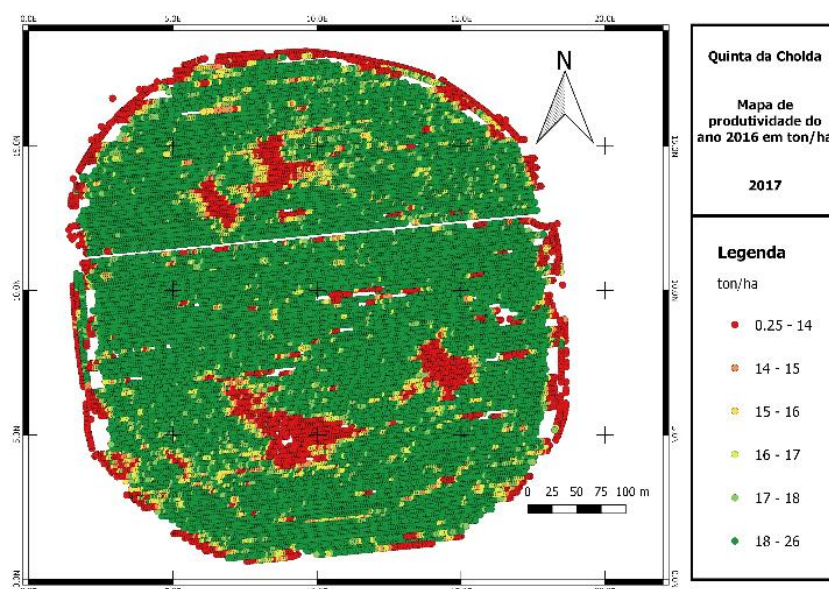


Figura 20. Carta de produtividade do ano 2016.

Nesta carta é bem visível a presença de 3 focos de baixas produtividades (pontos a encarnado que representam produtividade abaixo de 14 ton/ha), bem como toda a cabeceira em volta da mesma. Apesar das 3 zonas de menor produtividade, a maioria da parcela apresenta uma elevada produtividade.

Para percebermos as razões de baixa produtividade dos 3 focos mencionados, teremos de recorrer a uma comparação da produtividade com as diferentes variáveis em estudo (ponto 4.4). Já as cabeceiras da parcela são zonas onde o volume de rega normalmente não é adequado e onde se efetuam as voltas das máquinas de sementeira e adubação que por

vezes falham a aplicação de sementes e adubo, razões pela qual a produtividade é, grande parte das vezes, baixa.

3.1.5 Condutividade elétrica 2016

A carta 21 representa a condutividade elétrica do solo medida no ano de 2016 em mS/m.

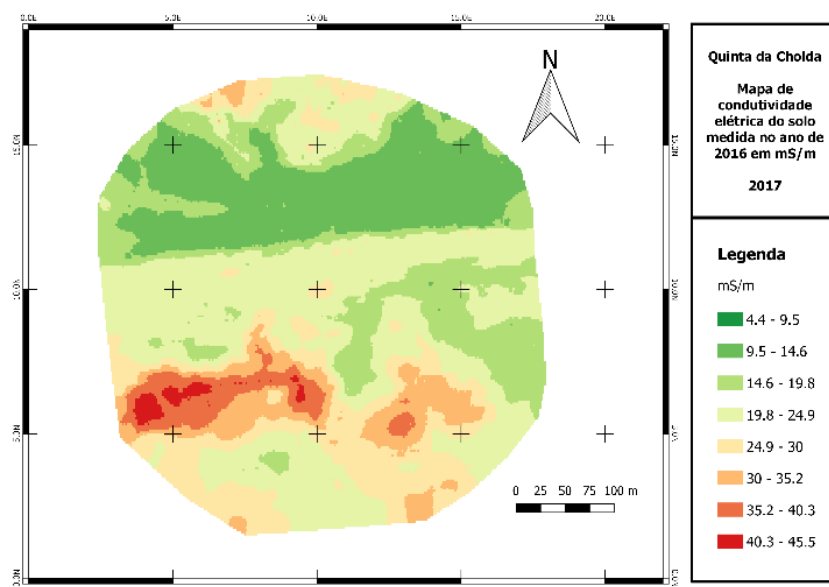


Figura 21. Mapa de condutividade elétrica do solo medida no ano de 2016.

A condutividade elétrica é um dado importante já que, para além de indicar a salinidade de um solo, poderá também permitir ao agricultor identificar níveis de fertilidade do solo, já que existe relação entre este parâmetro, as características edáficas da parcela e a produtividade das culturas. A condutividade elétrica elevada é indicativa da presença de sais no solo que limitam a absorção de água pelas plantas, reduzindo o potencial osmótico, tornando assim mais difícil a absorção de água pela planta. É importante referir que os valores de condutividade são bastante baixos, o que quer dizer que o solo não é salino (> 400 mS/m).

Neste mapa podemos identificar 2 zonas distintas, uma delas onde a condutividade elétrica é bastante baixa (a norte da parcela) e uma pequena mancha a sul onde a condutividade é elevada. Nota-se alguma variabilidade espacial deste parâmetro.

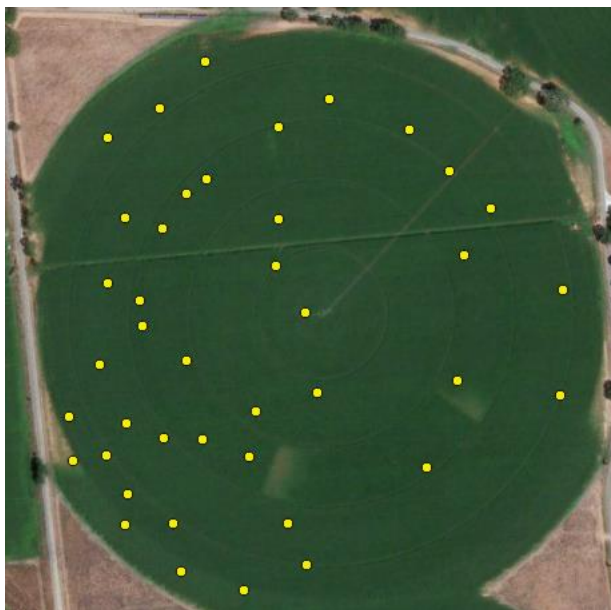
É importante comparar a condutividade elétrica com as variáveis em estudo para se perceber que relação há entre elas e aferir que variáveis poderão ser limitantes à produtividade nesta parcela.

3.2. Delineamento experimental

3.2.1 Amostragem, recolha e análise de solos

Na parcela Lameiras, foram marcados 41 pontos de amostragem (figura 20) com base em cartas de produtividade dos anos anteriores e em cartas de condutividade elétrica.

Cada ponto de amostragem foi georreferenciado com auxílio do equipamento Trimble Geo XT.



*Figura 22. Ilustração dos pontos de amostragem da parcela Lameiras.
Fonte: autor*

Em cada ponto foram colhidas 3 amostras dentro de um círculo com cerca de 0,5 m de diâmetro para fazer o volume necessário para a análise. As amostras foram colhidas com a ajuda de uma sonda, e colocadas em sacos, para serem enviadas para um laboratório para posterior análise.

Em seguida as amostras foram enviadas para o laboratório da UTAD (Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro) onde foram analisadas (anexo 9). Das 41 amostras foram obtidos valores de:

- pH em água e pH em KCl, pelo método de potenciometria em suspensões 1:2,5 de solo em H₂O 0,01M e KCl 2M;
- Matéria Orgânica por determinação do C orgânico por analisador elementar (Elementar Analysensysteme Informations, 2008) com detetor NIR e aplicação do fator 1,724;

- P e K pelo método de extração com solução de Egner-Riehm (Égner *et al.*, 1960) e determinação do P por espectrofotometria de absorção molecular e K por espectrofotometria por emissão de chama;
- P pelo método de extração de Olsen (Olsen *et al.*, 1954), extração com solução de bicarbonato de sódio 0,5M e determinação do P por espectrofotometria de absorção molecular.

De 27 do total das amostras, foram recolhidos os valores de:

- Ca, Mg, K e Na (bases) de troca obtidos através do método de extração com acetato de amónio 1M a pH 7 e determinação do Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atómica e do K e Na por espectrofotometria por emissão de chama (Póvoas e Barral, 1992);
- condutividade elétrica através de extração com H₂O (relação 1:5) e determinação por electrometria;
- N total em analisador elementar (Elementar Analysensysteme Informations, 2008), com determinação por condutividade térmica com base no método de Dumas (1831);
- relação C/N;
- B pelo método de extração de água fervente (Berger e Troug, 1939) e determinação por espectrofotometria de absorção molecular segundo o método de azometina-H (Parker e Gardner, 1981; Zarcinas, 1995);
- Zn, Cu, Mn e Fe pelo método de extração de Lindsay e Norvell para solos calcários (Lindsay e Norvell, 1978) ou solução de Lakanen para solos de reação neutra ou ácida, e determinação dos nutrientes por espectrofotometria de absorção atómica;

E de 7 do total das amostras foram analisados os teores de:

- areia grossa, areia fina, limo e argila obtidos por crivagem, sedimentação e pipetagem (método da pipeta de Robinson).

Foram também efetuadas recomendações de fertilização nos respetivos pontos amostrados de cada variável, com base nos valores de nutrientes obtidos:

- N;
- P₂O₅;
- K₂O;
- Mg;
- B;
- Zn;

- Cu;
- Mn;
- Fe.

3.2.2 Abertura e descrição dos perfis de solo

No dia 13 de abril, procedeu-se à abertura de 3 perfis de solo, com o objetivo de melhor conhecer o solo onde, ano após ano, o milho cresce e se desenvolve. Os 3 locais foram marcados com base no histórico de produtividade e na condutividade elétrica desta parcela: o perfil 1 num local onde o solo é um aluviossolo moderno, com produtividade do ano 2016 alta (entre 18 e 26 ton/ha) e condutividade elétrica média (entre 19,8 e 24,9 mS/m), o perfil 2 num local onde a condutividade elétrica é mais elevada (entre 40,3 e 45,5 mS/m) e coincide com uma baixa produtividade do ano 2016 (abaixo das 14 ton/ha), e o perfil 3 num local onde o solo insere-se na categoria dos aluviossolos antigos, com produtividade do ano 2016 intermédia (entre 14 e 17 ton/ha) e baixa condutividade elétrica (entre 4,4 e 9,5 mS/m) (figura 21).

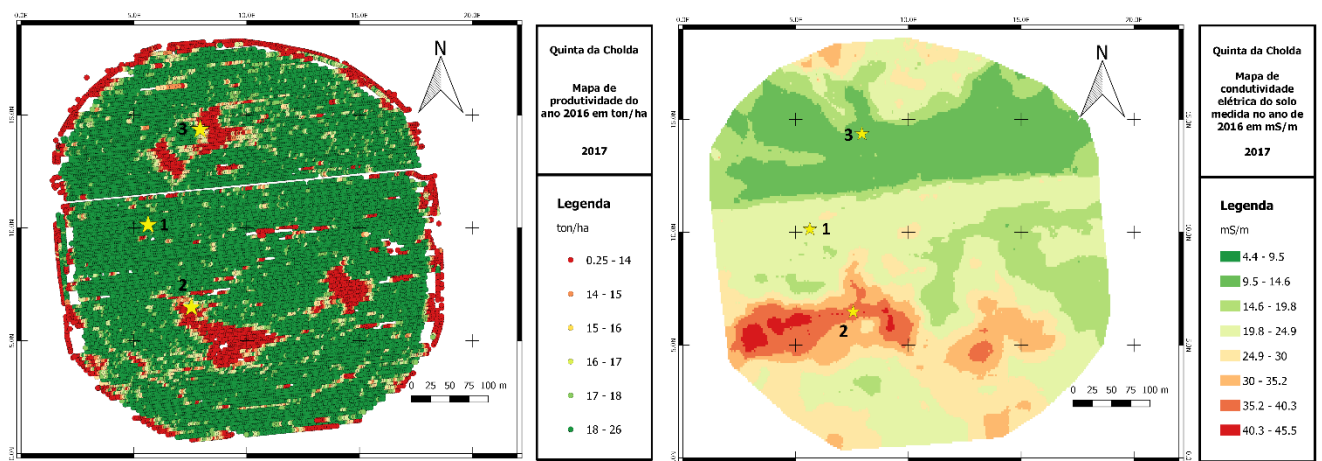


Figura 23. Locais onde foram abertos os perfis de solo consoante a produtividade do ano 2016 (esquerda) e a condutividade elétrica (direita).

No dia 18 de abril foi realizada a observação e descrição dos perfis com o auxílio do Professor Nuno Cortez (figura 22).



Figura 24. Fotografia tirada durante a observação e recolha de amostras dos perfis de solo.
Fonte: Autor

Foram ainda recolhidas, em cilindros, 3 amostras de 3 horizontes dos perfis 1 (0-20 cm, 20-45 cm e 80 cm) e 3 (0-20 cm, 20-30 cm e 80 cm) e 3 amostras de 2 horizontes do perfil 2 (0-15 cm e 15-25 cm) para posterior análise de massa volúmica aparente (anexos 3, 4 e 5).

Para além dos cilindros, foram também recolhidas, em sacos, 5 amostras do perfil 1 (0-20 cm, 20-45 cm, 50 cm, 70 cm e 90-100 cm), 5 do perfil 2 (0-15 cm, 15-50 cm, 50-100 cm, 100-150 cm e 150-170 cm) e 4 do perfil 3 (0-20 cm, 20-50 cm, 50-100 cm, 100-150 cm) para fazer a determinação da humidade do solo (anexo 6) e ainda uma análise mecânica (anexo 8), através da qual se determinam as texturas de cada horizonte amostrado.

3.2.2.1 Análises das amostras

3.2.2.1.1 Análise de massa volúmica aparente

A densidade aparente (equação 1) representa a relação entre a massa de solo seco e a soma do volume ocupado pelas partículas e pelos poros e é representada em g/cm^3 . É uma forma indireta de termos uma ideia sobre a porosidade do solo. É um dado importante para perceber se o solo está ou não compactado. Por exemplo, um solo argiloso deverá ter uma massa volúmica aparente mais baixa que um solo arenoso, visto que o solo argiloso é composto por partículas mais pequenas que, agregadas, devem gerar bastantes microporos que por sua vez vão ter maior volume total em relação aos poros de um solo arenoso, desde que não exista uma compactação extraordinária do solo.

$$\bullet \quad \text{MvAP} (\text{g/cm}^3) = \frac{\text{massa de solo seco (g)}}{\text{volume total}} \quad [1]$$

Procedimento:

As amostras dos cilindros foram colocadas numa estufa a 105 °C durante 6 dias até atingirem temperatura constante, altura em que foram retiradas, com a ajuda de uma garra metálica, e inseridas num exsicador durante 2 horas para que arrefeçam até ficarem à temperatura ambiente, numa atmosfera isenta de humidade.

Em seguida, cada amostra foi pesada dentro do cilindro fechado e, posteriormente removeu-se a terra do interior do mesmo e pesou-se só o cilindro. O peso de solo foi obtido pela diferença entre o cilindro cheio e o cilindro vazio.

Para obter o volume do cilindro (eq. 2) usou-se uma craveira, instrumento que serve para medir um comprimento, diâmetro ou profundidade de um objeto. Com a craveira mediu-se então o diâmetro interno e a altura do cilindro, cada uma 3 vezes e fez-se uma média das 3 medições, para que a medição fosse o mais precisa possível, já que por vezes, os cilindros utilizados nas amostras se encontram ligeiramente deformados.

- $vol\ cilindro = \pi r^2 h$ [2]

Depois de obtidos os valores do peso das amostras e do volume dos cilindros, obteve-se os valores de massa volúmica aparente pelo cálculo da equação 1.

3.2.2.1.2 Determinação da humidade do solo

A determinação da humidade do solo é importante para que o resultado da análise mecânica venha descrito relativamente à fase sólida do solo, ou seja, com o solo completamente ausente de humidade. Permite assim que os valores entre solos possam ser comparáveis, o que sem esta determinação seria impossível.

Procedimento (Póvoas e Barral, 1992):

Colocou-se cerca de 10 g de terra fina, seca ao ar e pesada numa balança analítica de precisão (figura 23) num pesa-filtros previamente tarado e seco numa estufa a cerca de 105 °C. Determinou-se a massa do conjunto.

Em seguida, secou-se os pesa-filtros com a terra numa estufa a cerca de 105 °C até atingir temperatura constante (cerca de 24 horas). Após as 24 horas, retiraram-se os pesa-filtros da estufa e colocaram-se num exsicador para arrefecerem e posteriormente serem pesados.



Figura 25. Balança analítica de precisão usada para pesar a terra fina.
Fonte: autor

Obtenção dos resultados

$$\% H = \frac{(b - c) \times 100}{c - a}$$

Em que:

H – humidade do solo

a – tara do pesa-filtros (g)

b – tara do pesa-filtros (g) + massa de terra fina seca ao ar (g)

c – tara do pesa-filtros (g) + massa de terra fina a 105°C (g).

3.2.2.1.3 Análise mecânica

A análise mecânica é importante para quantificar as partículas minerais elementares do solo, agrupadas em classes de acordo com o diâmetro médio, de modo a aferir as texturas (% de areia, limo e argila), ou composição granulométrica das amostras. É efetuada apenas na terra fina (diâmetro menor que 2 mm), que geralmente possui as partículas agregadas. Os tratamentos prévios efetuados servem para individualizar as partículas e posteriormente dispersá-las e isolá-las de acordo com a classe granulométrica.

A dispersão realiza-se agitando a amostra com uma solução dispersante de hexametáfosfato de sódio ((NaPO₃)₆), que forma um complexo indissociável com o ião cálcio e inativa o seu poder floculante (capacidade de um colóide em formar agregados).

De acordo com a Escala de Atterberg, recomendada pela International Society of Soil Science, consideram-se as seguintes classes granulométricas:

- AG – areia grossa (2 mm – 0,2 mm Ø)
- AF – areia fina (0,2 mm – 0,02 mm Ø)
- L – limo (0,02 mm – 0,002 mm Ø)
- A – argila (<0,002 mm Ø)

Estas classes determinam-se da seguinte forma:

- Areia grossa – crivagem

- Areia fina – sedimentação e decantação
- Limo – sedimentação e pipetagem
- Argila – sedimentação e pipetagem.

O tempo de sedimentação é calculado a partir da lei de Stokes (equação 3), a qual foi desenvolvida para calcular a velocidade de deposição de partículas. A fórmula apresentada aplica-se a esferas com diâmetro entre 0,0002 mm e 0,2 mm. A pipetagem é efetuada com a pipeta de Robinson.

$$V_s = \frac{[2 \times g \times r^2 (\rho_1 - \rho_2)]}{9 \times \mu} \quad [3]$$

Sendo:

- V_s – velocidade de sedimentação
- g - aceleração da gravidade (cm/s^2)
- r - raio das partículas, consideradas esféricas (cm)
- ρ_1 - massa volúmica das partículas (g/cm^3)
- ρ_2 - massa volúmica do líquido (g/cm^3)
- μ - viscosidade dinâmica do líquido (poises)

Procedimento (Póvoas e Barral, 1992):

As amostras dos sacos foram secas à temperatura ambiente durante 50 dias, altura em que começou a ser feita a análise mecânica das mesmas.

Em primeiro lugar, fez-se uma crivagem, na qual se separaram os elementos grosseiros e a terra fina, com um crivo de 2 mm (figura 24). Como as amostras tinham os elementos muito agregados, foi necessário usar o almofariz (figura 24) para os desagregar. Os elementos grosseiros foram colocados em sacos separados da terra fina e cada saco pesado em separado (figura 25) (anexo 7).



*Figura 26. Utensílios usados na crivagem das amostras (esquerda – almofariz; direita – crivo).
Fonte: autor*

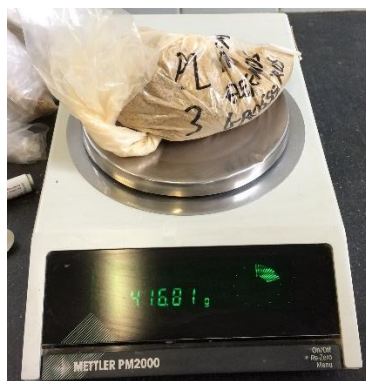


Figura 27. Pesagem dos sacos com os elementos separados na crivagem.
Fonte: autor

Preparação da amostra para dispersão

Pesou-se, numa balança analítica de precisão (figura 25), aproximadamente 20 gramas de cada saco de terra fina que foram posteriormente colocados em gobelés.

Oxidação da matéria orgânica:

Juntou-se às amostras de 20 g de terra fina 15 ml de água destilada e 15 ml de água oxigenada a 30% (100 volumes). Deixou-se em repouso e levou-se os copos a banho-maria para que se desse uma fraca ebulição, de forma a evitar destruir a água oxigenada imediatamente.

Juntou-se água destilada até cerca de 300 ml e em seguida pôs-se os copos na placa elétrica até ferver para eliminar o excesso de água oxigenada.

Dispersão

Depois de tratada, transferiu-se a amostra para um frasco de agitação e juntou-se 20 ml da solução dispersante de hexametáfosfato de sódio e cerca de 400 ml de água destilada.

Colocou-se os frascos num agitador vaivém durante 16 horas (120 oscilações/minuto).

Separação das frações

Passou-se os conteúdos dos frascos para um cilindro de sedimentação.

Limo + argila (< 0,02 mm) e argila (< 0,002 mm)

Adicionou-se água destilada até os cilindros de sedimentação atingirem 1000 ml e agitou-se os mesmos durante 1 minuto. Depois colocou-se os cilindros num local firme e sem variações de temperatura.

Para as colheitas do limo + argila e argila usou-se uma pipeta de Robinson de 25 ml que se mergulhou na suspensão a 10 cm de profundidade uns segundos antes de terminar o tempo

de sedimentação (quadro 5). O tempo de sucção do limo + argila foi de 6 segundos e o da argila 12 segundos.

Os volumes colhidos juntamente com a água de lavagem da pipeta foram então colocados em pesa-filtros previamente tarados e secos numa estufa a cerca de 105 °C.

Em seguida secou-se os pesa-filtros com as soluções numa estufa a cerca de 105 °C durante 24 horas. Após as 24 horas, retiraram-se os pesa-filtros da estufa e colocaram-se num exsiccador para arrefecerem e posteriormente serem pesadas - L + A e A.

Depois fez-se um ensaio em branco (EB - 20 ml de solução dispersante para 1000 ml) para ser descontado no peso referente à recolha da argila.

Areia fina (0,2 mm – 0,02 mm)

Decantou-se a suspensão contida no cilindro de sedimentação com um sifão até 5 cm do fundo e transferiu-se o líquido residual para um copo de 800 ml previamente marcado com 2 traços, um a 2 cm do fundo do copo e outro a 10 cm deste.

Em seguida adicionou-se água destilada até ao traço superior, agitou-se e deixou-se sedimentar durante o tempo indicado no quadro 5 para limo + argila (< 0,02 mm). Depois decantou-se, com um sifão, todo o líquido até ao traço inferior e repetiu-se este processo até ao líquido sobrenadante estar límpido.

Passou-se depois o resíduo (areia fina) para copos de 100 ml previamente tarados e secos numa estufa a cerca de 105 °C e secou-se os mesmos, já contendo a areia fina, numa estufa à mesma temperatura durante 24 horas.

Após as 24 horas, retiraram-se os copos da estufa e colocaram-se num exsiccador para arrefecerem e posteriormente serem pesados - AF.

Quadro 5. Tempo de sedimentação para pipetagem das frações limo+argila e argila a 10 cm de profundidade.

(Válida para Lisboa)

Temperatura °C	Tempo de sedimentação para pipetagem a 10 cm de profundidade			
	(Limo + argila) < 0,020 mm		Argila < 0,002 mm	
	Minutos	Segundos	Horas	Minutos
10	6	14	10	23
11	6	3	10	6
12	5	54	9	49
13	5	44	9	34
14	5	35	9	19
15	5	27	9	5
16	5	19	8	51
17	5	10	8	37
18	5	3	8	24
19	4	55	8	12
20	4	48	8	0
21	4	41	7	48
22	4	34	7	37
23	4	28	7	26
24	4	22	7	16
25	4	15	7	6
26	4	10	6	56
27	4	4	6	47
28	3	59	6	38
29	3	54	6	29
30	3	48	6	21
31	3	43	6	12
32	3	39	6	5
33	3	34	5	57
34	3	30	5	50
35	3	26	5	43

Obtenção dos resultados:

- $\% \text{ argila} = 200 \times (A - EB)$
- $\% \text{ limo} = 200 \times [(L + A) - A]$
- $\% \text{ areia fina} = 5 \times AF$

Em que:

A - massa de argila correspondente a 25 ml (g)

L - massa de limo correspondente a 25 ml (g)

AF – massa de areia fina (g)

3.2.2.2 Descrição dos perfis

Perfil 1 (figura 26): contém 5 horizontes.

O primeiro horizonte Ap (0-20 cm) - Pardo amarelado a pardo amarelado claro (10YR 5,5/4) (s); Pardo a pardo escuro (7,5YR 4/4) (h); Franco com algum saibro; Com bastantes resíduos orgânicos (restolho da cultura); Anisoforme subangulosa média a muito grosseira moderada; Compacidade média; Friável a firme; Moderadamente poroso; Bastantes raízes finas e algumas médias; Fresco; Transição evidente, plana, para

O horizonte C1 (20-45 cm) - Material amarelo avermelhado (7,5YR 6/6) (s); Pardo a pardo avermelhado (6,75YR 4/3) (h); Franco-argiloso; Maciço; Compacidade grande; Muito firme; Pouco poroso; Raras raízes muito finas; Fresco; Transição evidente, plana, para

O horizonte 2C2 (45-62 cm) - Material amarelo avermelhado (7,5YR 6/7) (s); Pardo avermelhado (5YR 4/4) (h); Franco-argilo-limoso; Maciço ; Compacidade muito grande; Extremamente firme; Sem raízes; Fresco; Transição evidente, plana, para

O horizonte 3C3 (62-104 cm) - Material amarelo pardacento a pardo amarelado claro (10YR 6/5) (s); Pardo amarelado escuro (10YR 4/4) (h); Franco-arenoso; Maciço; Compacidade grande; Firme; Sem raízes; Fresco; Transição evidente, plana, para

O horizonte 4C4 (104-150 cm) - Material pardo amarelado claro (10YR 6/4) (s); Pardo amarelado escuro (10YR 4/4) (h); Franco-arenoso; Maciço; Compacidade grande; Duro; Sem raízes; Pouco fresco.

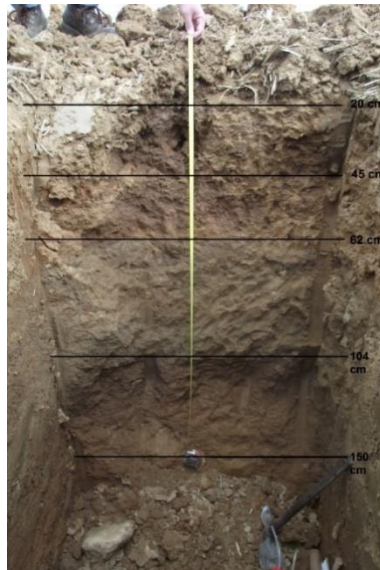


Figura 28. Perfil de solo 1
Fonte: autor

Perfil 2 (figura 27): contém 5 horizontes.

O primeiro horizonte Ap (0-15 cm) - Pardo amarelado (10YR 6/4) (s); Pardo amarelado escuro (10YR 4/4) (h); Franco-argiloso com raro saibro; Com bastantes resíduos orgânicos (restolho da cultura); Anisoforme subangulosa média a muito grosseira moderada a forte; Compacidade média a grande; Friável a firme; Moderadamente poroso; Bastantes raízes finas e algumas médias; Fresco; Transição evidente, plana, para

O horizonte C1 (15-50 cm) - Material pardo amarelado a amarelo pardacento (10YR 6/5) (s); Pardo a pardo escuro (7,5YR 4/4) (h); Franco-argiloso; Maciço; Compacidade grande; Muito firme; Pouco poroso; Raras raízes muito finas; Fresco; Transição evidente, plana, para

O horizonte 2C2 (50-100 cm) - Material amarelo pálido (2,5Y 7/4) (s); Pardo oliváceo claro (2,5Y 5/5) com manchas irregulares acinzentadas e azuladas (h); Franco-argilo-limoso; Maciço; Compacidade muito grande; Extremamente firme; Sem raízes; Fresco; Transição evidente, plana, para

O horizonte 3C3 (100-150 cm) - Material amarelo pálido a pardo amarelado claro (2,5Y 6,5/4) (s); Pardo oliváceo claro (2,5Y 5/5) (h); Franco-argiloso; Maciço; Compacidade muito grande; Extremamente firme; Sem raízes; Fresco; Transição evidente, plana, para

O horizonte 4C4 (150-170 cm) - Material pardo amarelado (10YR 5/6) (s); Pardo (7,5YR 4,5/4) (h); Franco-arenoso; Maciço; Compacidade grande; Duro; Sem raízes; Pouco fresco.

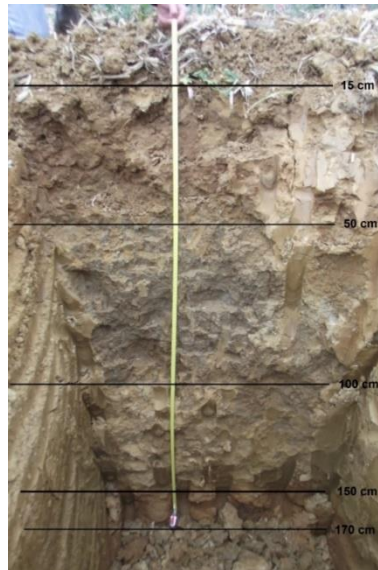


Figura 29. Perfil de solo 2
Fonte: autor

Perfil 3 (figura 28): contém 4 horizontes.

O primeiro horizonte Ap (0-20 cm) - Pardo a pardo pálido (10YR 5,5/3) (s); Pardo escuro (10YR 3,5/3) (h); Franco-arenoso com pouco saibro; Com bastantes resíduos orgânicos (restolho da cultura); Maciço a anisoforme subangulosa média a muito grosseira forte; Compacidade média a grande; Friável a firme; Moderadamente poroso; Bastantes raízes finas e algumas médias e grossas; Fresco; Transição evidente, plana, para

O horizonte C1 (20-50 cm) - Material pardo amarelado claro (10YR 6/4) (s); Pardo amarelado escuro (10YR 4/4) (h); Franco-arenoso; Maciço; Compacidade grande; Muito firme; Pouco poroso; Raras raízes muito finas; Fresco; Transição evidente, plana, para

O horizonte 2C2 (50-100 cm) - Material pardo amarelado claro (10YR 6/4) (s); Pardo amarelado escuro (10YR 4/4) (h); Franco; Maciço; Compacidade muito grande; Extremamente firme; Pouco poroso; Sem raízes; Fresco; Transição evidente, plana, para

O horizonte 3C3 (100-150 cm) - Material amarelo a amarelo pardacento (10YR 6,5/6) (s); Pardo amarelado (10YR 5/7) com pontuações e manchas avermelhadas e acinzentadas (h); Franco; Maciço; Compacidade muito grande; Extremamente firme; Fechado; Sem raízes; Fresco.

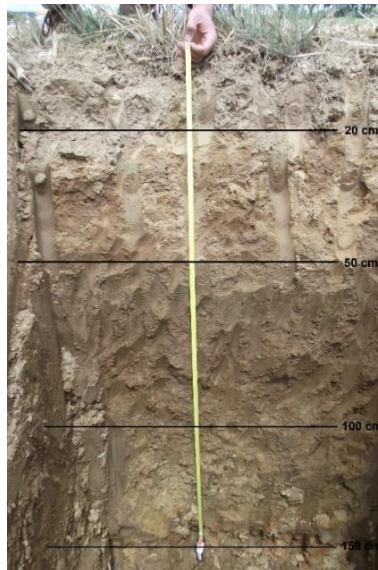


Figura 30. Perfil de solo 3

Fonte: autor

3.2.3 Interpolação espacial dos dados das amostras

Como temos poucos pontos de amostragem nos quais se fizeram as análises ao solo, é necessário aferir valores de pontos na parcela não amostrados. Assim sendo, procedeu-se à interpolação espacial pelo método de *kriging*. Para isso usou-se o programa Vesper®.

As variáveis sujeitas a interpolação espacial através do método de *kriging* foram:

- P e K obtidos pelo método de Egner-Riehm;
- P obtido pelo método de Olsen;
- N total
- Ca de troca;
- Cu, Mn e Fe obtidos pelo método de extração de Lindsay;
- areia grossa, areia fina, limo e argila.

A todas as outras variáveis não foi possível obter a interpolação espacial através do *kriging* porque os seus valores não apresentam autocorrelação espacial, e como tal, não foi possível obter o variograma e proceder à krigagem. Assim sendo, submeteram-se a interpolação no programa QGIS através do IDW:

- pH em água e em KCl;
- Matéria orgânica
- Mg, K, Na de troca;
- Condutividade elétrica;
- Relação C/N;
- Boro obtido pelo método de extração de água fervente;

- Zinco obtido pelo método de extração de Lindsay.

3.2.4 Elaboração das cartas de prescrição

Os resultados das análises de solos da UTAD vieram com uma recomendação de fertilização de alguns nutrientes nos pontos amostrados (anexo 10). Esta recomendação foi calculada para uma produção esperada de 17 ton/ha.

Para obter as cartas de prescrição, os valores recomendados em cada ponto de amostragem também foram sujeitos a interpolação espacial pelo método de *kriging*:

- N;
- P_2O_5 ;
- K_2O ;
- Mg;
- Zn.

Os restantes resultados não puderam ser interpolados espacialmente visto também não terem uma relação espacial relevante, pois também apresentam uma baixa variância. Assim sendo, foram submetidos a interpolação espacial no programa QGIS pelo método de IDW:

- B;
- Cu;
- Mn;
- Fe.

Assim sendo, foi possível obter cartas de prescrição destes nutrientes, com os valores necessários em cada ponto da parcela.

3.2.5 Análise estatística

Relativamente à estatística descritiva das variáveis, bem como a análise de correlação entre elas foram efetuadas no software *Statistica*.

O nível de significância usado foi inferior a 0,05.

4. Resultados e discussão

4.1. Estatística descritiva

Os dados, obtidos por análise laboratorial na UTAD, das amostras de solo foram submetidos a uma análise de estatística descritiva. Esta análise é efetuada para verificar a variabilidade existente na parcela e saber se esta se encontra apta ao estudo que se pretende fazer. A análise foi feita no *software* Statistica.

De todos os indicadores estatísticos, o mais importante para o estudo é o coeficiente de variação, que é resultado do quociente entre o desvio padrão e a média dos valores de cada variável. É um indicador de grande relevância, uma vez que um dos principais objetivos deste trabalho é medir a variabilidade da fertilidade da parcela, pois indica qual o desvio relativo que os valores das variáveis podem tomar em relação à média.

Os resultados da análise efetuada encontram-se no quadro 6, do qual podemos destacar alguma informação importante. As variáveis com maior coeficiente de variação e, portanto, com maior variabilidade espacial na parcela são o boro obtido através do método de extração de água fervente e o cobre obtido através do método de extração de Lindsay, com coeficientes de 72% e 91% respetivamente. Estes valores são importantes e favoráveis tendo em conta o objetivo do estudo em causa.

O fósforo obtido pelo método de Egner-Riehm e obtido pelo método de Olsen, o zinco, manganês e ferro obtidos através do método de extração de Lindsay apresentam coeficientes de variação bastante significativos, atingindo valores de 49%, 45%, 59%, 46% e 41% respetivamente.

Com coeficientes de variação quase nulos e, por isso, não apresentando variabilidade (c.v. < 10%), encontram-se as variáveis de pH em água, pH em KCl e a relação carbono/azoto, com valores de 2%, 3% e 4% respetivamente.

Quadro 6. Estatística descritiva dos resultados das amostras de solo.

	pH água	pH KCl	Matéria orgânica (%)	P Egner-Riehm (mg P2O5/kg)	K Egner-Riehm (mg K2O/kg)	P-Olsen (mg P2O5/kg)	Ca troca (cmol(c)/kg)	Mg troca (cmol(c)/kg)	K troca (cmol(c)/kg)	Na troca (cmol(c)/kg)	Condutividade (dS/m)	N total (g/kg)	Relação C/N	B ext água fervente (mg B/kg)	Zn - extr Lindsay (mg Zn/kg)	Cu - extr Lindsay (mg Cu/kg)	Mn - extr Lindsay (mg Mn/kg)	Fe - extr Lindsay (mg Fe/kg)	Areia grossa (%)	Areia fina (%)	Limo (%)	Argila (%)
Média	7,1	6,4	1,7	68,6	372,4	34,3	9,8	2,6	0,8	0,3	0,1	1,0	9,8	0,6	1,7	1,3	35,0	20,0	156,7	334,7	216,8	291,8
Mediana	7,1	6,4	1,7	61,6	346,4	32,2	9,5	2,6	0,8	0,3	0,1	1,0	9,8	0,4	1,5	0,8	36,9	18,0	158,5	334,3	234,4	287,1
Mínimo	6,8	6,0	1,1	17,4	245,4	9,0	5,9	1,6	0,6	0,1	0,0	0,8	9,1	0,1	0,3	0,3	8,6	10,4	106,4	218,7	145,0	193,0
Máximo	7,4	6,8	2,4	155,5	658,1	71,0	17,5	4,9	1,4	0,5	0,1	1,3	10,3	1,6	3,8	4,2	68,6	45,3	197,9	441,5	259,3	364,9
1º Quartil	7,0	6,3	1,5	45,7	315,5	25,9	7,1	2,0	0,7	0,3	0,1	0,9	9,5	0,2	0,9	0,7	20,0	13,7	127,2	250,2	167,6	257,2
3º Quartil	7,2	6,4	1,8	89,6	402,1	41,9	10,9	3,0	0,9	0,4	0,1	1,1	10,1	0,8	2,5	1,0	46,1	24,0	175,2	392,7	249,5	363,5
Amplitude	0,6	0,8	1,3	138,1	412,7	62,0	11,6	3,3	0,9	0,4	0,1	0,5	1,2	1,5	3,5	3,8	60,0	34,9	91,5	222,8	114,3	171,9
Variância	0,0	0,0	0,1	1135,0	8929,4	234,8	9,1	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	1,0	1,3	260,9	65,5	957,3	6263,6	1863,1	3613,9
Desvio Padrão	0,2	0,2	0,3	33,7	94,5	15,3	3,0	0,8	0,2	0,1	0,0	0,1	0,4	0,4	1,0	1,2	16,2	8,1	30,9	79,1	43,2	60,1
Coefficiente de Variação	2,4	2,5	16,5	49,1	25,4	44,6	30,8	30,9	24,1	24,9	23,9	10,9	3,7	71,6	59,2	91,0	46,2	40,5	19,7	23,6	19,9	20,6

4.2. Análise de correlação

A análise de correlação serve para medir o grau de relação existente entre cada variável presente no estudo. É medido através do coeficiente de correlação que pode tomar valores entre -1 e 1. Como os parâmetros analisados laboratorialmente possuem diferente número de valores, não foi possível analisar todos de uma vez. Assim sendo, analisou-se separadamente os parâmetros com 41 valores, os com 27 valores e os com 7 valores. Os resultados são apresentados nos quadros 7, 8 e 9.

Fez-se também uma correlação entre a produtividade e os parâmetros obtidos laboratorialmente, cujos resultados são apresentados no quadro 10.

Analisando as correlações mais significativas ($p < 0,05$) entre os parâmetros com 41 valores (quadro 7), verificou-se que o pH em água apresenta uma forte correlação com o pH em KCl, $r = 85\%$.

O P obtido através do método de Olsen tem uma forte correlação com o P obtido pelo método de Egner-Riehm com um $r = 90\%$.

A % de matéria orgânica revela uma correlação ligeira com o P obtido pelos métodos de Olsen e de Egner-Riehm, com valores de 43% e 48%, respetivamente.

O pH em KCl apresenta uma correlação positiva com o K obtido pelo método de Egner-Riehm, $r = 35\%$.

Em análise às correlações mais significativas ($p < 0,05$) dos parâmetros com 27 valores (quadro 8), podemos observar que:

O pH em água apresenta uma correlação significativa com o Mg de troca (31%) e a relação C/N (31%). A % de matéria orgânica existente no solo está fortemente correlacionada com o N total e a relação C/N, 98% e 78%, respetivamente e apresenta uma correlação significativa com o Ca e o K de troca e com a maioria dos micronutrientes, B, Zn, Mn e Fe.

O P obtido através do método de Egner-Riehm tem uma forte correlação com o N total (63%) e com o Fe (78%) e correlação significativa com o K de troca, a relação entre C/N e alguns micronutrientes, Zn, Cu e Mn.

O K obtido através do método de Egner-Riehm tem uma correlação muito forte com o K de troca (97%) e correlação significativa com Ca e Mg de troca, bem como o N total, a relação entre C/N e os micronutrientes B, Cu e Fe.

O P obtido através do método de Olsen tem uma forte correlação com o Fe (77%) e correlações significativas com o K de troca, N total, a relação entre C/N e os micronutrientes Zn, Cu e Mn.

O Ca de troca apresenta forte correlação com o Mg e o Na de troca, 87% e 69%, respectivamente; apresenta ainda uma correlação significativa com outros nutrientes, tendo-se registado valores de 48% para o K de troca, 48% para o N total e 35% para o B.

As correlações positivas com o K de troca (47%), Na de troca (55%), N total (36%) e B (36%) demonstram que o Mg de troca está relacionado com estes nutrientes.

O K de troca tem uma correlação significativa com o N total (47%), B (34%), e Fe obtido por extração de Lindsay (46%); apresenta ainda uma ligeira correlação negativa com o Cu obtido por extração de Lindsay (- 31%).

A correlação com o Na de troca (- 30%) revela que a condutividade elétrica está relacionada com a presença deste nutriente no solo.

O N total tem uma forte correlação com a relação C/N (63%); apresenta também uma correlação bastante significativa com o B (51%) e com o Fe obtido por extração de Lindsay (53%).

As correlações positivas dos nutrientes obtidos pelo método de Lindsay, Zn (52%), Cu (34%), Mn (42%) e Fe (46%) revelam que têm alguma influência no parâmetro da relação C/N.

O Zn obtido pelo método de extração de Lindsay está fortemente correlacionado com o Cu e Mn obtidos pelo mesmo método, apresentando valores de 82% e 77%, respectivamente, e também tem uma ligeira correlação com o Fe obtido pelo mesmo método.

O Cu obtido pelo método de Lindsay apresenta correlação significativa com o Mn obtido pelo mesmo método ($r = 56\%$).

Analisando as correlações mais significativas ($p < 0,05$) entre os parâmetros (de granulometria) com 7 valores (quadro 9), podemos destacar a seguinte informação:

A quantidade de limo está fortemente correlacionada com as quantidades de areia fina (- 72%) e grossa (- 60%) e a quantidade de argila está correlacionada com as outras classes granulométricas, de uma forma ligeira com a areia grossa (- 37%), fortemente com a areia fina (- 91%) e significativamente com o limo (54%).

Analisando as correlações mais significativas ($p < 0,05$) entre a produtividade e os parâmetros medidos laboratorialmente (quadro 10), verificou-se que:

A produtividade não apresenta forte correlação com nenhum parâmetro, mas apresenta correlação significativa com a maior parte dos micronutrientes, Zn, Cu, Mn e Fe, com 48%, 36%, 56% e 33% respectivamente. Também apresenta correlação negativa significativa com as classes granulométricas areia grossa (- 49%) e argila (- 36%) e positiva com areia fina (33%).

Quadro 7. Análise de correlação dos parâmetros com 41 valores ($p < 0,05$). A azul estão os valores com correlação ligeira e a encarnado os significativamente relacionados.

	pH água	pH KCl	Matéria orgânica (%)	P Egner-Riehm (mg P ₂ O ₅ /kg)	K Egner-Riehm (mg K ₂ O/kg)	P-Olsen (mg P ₂ O ₅ /kg)
pH água	1,00					
pH KCl	0,85	1,00				
Matéria orgânica (%)	0,01	0,12	1,00			
P Egner-Riehm (mg P ₂ O ₅ /kg)	-0,19	0,03	0,48	1,00		
K Egner-Riehm (mg K ₂ O/kg)	0,22	0,35	0,25	0,24	1,00	
P-Olsen (mg P ₂ O ₅ /kg)	-0,27	-0,08	0,43	0,90	0,18	1,00

Quadro 8. Análise de correlação dos parâmetros com 27 valores ($p < 0,05$). A azul estão os valores com correlação ligeira e a encarnado os significativamente relacionados.

	pH água	pH KCl	Matéria orgânica (%)	P Egner-Riehm (mg P2O5/kg)	K Egner-Riehm (mg K2O/kg)	P-Olsen (mg P2O5/kg)	Ca troca (cmol(c)/kg)	Mg troca (cmol(c)/kg)	K troca (cmol(c)/kg)	Na troca (cmol(c)/kg)	Condutividade (dS/m)	N total (g/kg)	Relação C/N	B ext água fervente (mg B/kg)	Zn - extr Lindsay (mg Zn/kg)	Cu - extr Lindsay (mg Cu/kg)	Mn - extr Lindsay (mg Mn/kg)	Fe - extr Lindsay (mg Fe/kg)
pH água																		
pH KCl																		
Matéria orgânica (%)																		
P Egner-Riehm (mg P2O5/kg)																		
K Egner-Riehm (mg K2O/kg)																		
P-Olsen (mg P2O5/kg)																		
Ca troca (cmol(c)/kg)	0,11	0,13	0,40	0,12	0,35	0,09	1,00											
Mg troca (cmol(c)/kg)	0,31	0,22	0,29	-0,03	0,35	-0,10	0,87	1,00										
K troca (cmol(c)/kg)	-0,01	0,08	0,47	0,35	0,97	0,35	0,48	0,47	1,00									
Na troca (cmol(c)/kg)	0,16	0,24	0,13	0,07	0,07	0,03	0,69	0,55	0,19	1,00								
Condutividade (dS/m)	-0,14	0,00	0,03	-0,03	-0,20	-0,05	-0,27	-0,14	-0,18	-0,30	1,00							
N total (g/kg)	-0,14	0,00	0,98	0,63	0,44	0,55	0,48	0,36	0,47	0,17	0,03	1,00						
Relação C/N	-0,31	0,03	0,78	0,57	0,34	0,48	0,00	-0,03	0,30	-0,03	0,04	0,63	1,00					
B ext água fervente (mg B/kg)	0,13	0,11	0,47	0,16	0,33	0,01	0,35	0,36	0,34	0,19	-0,10	0,51	0,24	1,00				
Zn - extr Lindsay (mg Zn/kg)	-0,02	0,15	0,43	0,56	0,03	0,41	-0,17	-0,03	0,01	-0,21	0,09	0,37	0,52	0,22	1,00			
Cu - extr Lindsay (mg Cu/kg)	-0,20	0,03	0,25	0,47	-0,30	0,31	-0,28	-0,28	-0,31	-0,19	0,19	0,20	0,34	-0,02	0,82	1,00		
Mn - extr Lindsay (mg Mn/kg)	-0,04	0,02	0,35	0,49	0,24	0,38	-0,21	-0,04	0,19	-0,21	-0,03	0,31	0,42	0,20	0,77	0,56	1,00	
Fe - extr Lindsay (mg Fe/kg)	-0,16	-0,07	0,56	0,78	0,44	0,77	0,08	0,06	0,46	-0,10	-0,03	0,53	0,46	0,10	0,33	0,11	0,34	1,00

Quadro 9. Análise de correlação dos parâmetros com 7 valores ($p < 0,05$). A azul estão os valores com correlação ligeira e a encarnado os significativamente relacionados.

	Areia grossa (%)	Areia fina (%)	Limo (%)	Argila (%)
Areia grossa (%)	1,00			
Areia fina (%)	0,21	1,00		
Limo (%)	-0,60	-0,72	1,00	
Argila (%)	-0,37	-0,91	0,54	1,00

Quadro 10. Análise de correlação da produtividade com os parâmetros medidos laboratorialmente ($p < 0,05$). A azul estão os valores com correlação ligeira e a encarnado os significativamente relacionados.

produtividade (ton/ha)	pH água	pH KCl	Matéria orgânica (%)	P Egner-Riehm (mg P2O5/kg)	K Egner-Riehm (mg K2O/kg)	P-Olsen (mg P2O5/kg)	Ca troca (cmol(c)/kg)	Mg troca (cmol(c)/kg)	K troca (cmol(c)/kg)	Na troca (cmol(c)/kg)	Condutividade (dS/m)	N total (g/kg)	Relação C/N	B ext água fervente (mg B/kg)	Zn - extr Lindsay (mg Zn/kg)	Cu - extr Lindsay (mg Cu/kg)	Mn - extr Lindsay (mg Mn/kg)	Fe - extr Lindsay (mg Fe/kg)	Areia grossa (%)	Areia fina (%)	Limo (%)	Argila (%)
	0,13	0,06	0,06	0,22	0,10	0,22	-0,19	-0,12	0,16	-0,02	-0,06	0,20	0,11	-0,05	0,48	0,36	0,56	0,39	-0,49	0,33	0,25	-0,36

4.3. Distribuição espacial

A partir dos dados obtidos da análise de solos realizada na UTAD, e posterior krigagem, foi possível elaborar cartas, que nos fornecem informação acerca da variabilidade espacial dos nutrientes.

No quadro 11 estão representadas as classes de fertilidade dos nutrientes no solo. Os valores apresentados no quadro foram usados como legenda nas cartas de distribuição espacial, para que se pudesse perceber o nível de teor de cada nutriente na parcela, e assim avaliar a mesma.

Quando o teor de um nutriente está muito baixo, há uma grande probabilidade de a cultura responder à aplicação desse mesmo nutriente. Em baixos teores de um nutriente, há forte probabilidade de a cultura responder à aplicação desse nutriente. Quando o teor é médio, prevê-se que, em alguns casos, a cultura responda à aplicação do nutriente. Em altos teores, nalguns casos e em anos favoráveis, é de prever que a cultura responda à aplicação do nutriente. Quando o teor é muito alto, não existe resposta à aplicação do nutriente, a não ser em anos muito favoráveis.

Quadro 11. Quadro relativo aos níveis de fertilidade dos nutrientes no solo.

	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
P₂O₅ (Olsen) (mg/kg)	< 20	20 - 35	35 - 55	55 - 115	> 115
P₂O₅ (Egner-Riehm) (mg/kg)	< 25	25 - 50	50 - 100	100 - 200	> 200
K₂O (Egner-Riehm) (mg/kg)	< 25	25 - 50	50 - 100	100 - 200	> 200
B (mg/kg)	< 0,3	0,3 - 0,6	0,6 - 1	1 - 2,5	> 2,5
Cu (mg/kg)	< 0,35	0,35 - 1	1 - 1,5	1,5 - 15	> 15
Zn (mg/kg)	< 0,8	0,8 - 1	1 - 3	3 - 10	> 10
Fe (mg/kg)	< 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	> 20
Mn (mg/kg)	< 4	4 - 8	8 - 12	12 - 30	> 30
M.O. (%)	< 0,6	0,6 - 1,6	1,6 - 4	4 - 8	> 8

No quadro 12 estão representadas as classes de teores da relação C/N no solo. Os valores apresentados no quadro foram usados como legenda na carta de distribuição espacial da relação C/N (figura 45).

Quadro 12. Quadro relativo às classes de teor da relação C/N no solo.

	Adequado	Moderadamente elevado	Elevado	Muito elevado
Relação C/N	< 10	10 - 12	12 - 15	> 15

No quadro 13 estão representadas as classes de acidez/alcalinidade de um solo. Os valores representados foram usados como legenda nas cartas de distribuição espacial do pH em água e em KCl.

Quadro 13. Quadro relativo às classes de acidez/alcalinidade de um solo.

	Muito ácido	Ácido	Moderadamente ácido	Neutro	Alcalino	Muito alcalino
pH em água	< 4,5	4,5 - 5,5	5,5 - 6,5	6,5 - 7,5	7,5 - 8,3	> 8,3
pH em KCl	< 4,5	4,5 - 5,5	5,5 - 6,5	6,5 - 7,5	7,5 - 8,3	> 8,3

4.3.1 Macronutrientes

A figura 31 é relativa à variabilidade espacial de N total existente na parcela. Podemos identificar 2 manchas principais de N, uma a sul da parcela onde se nota maior presença de N e outra a norte da mesma onde se nota défice de N. Apesar de haver manchas que revelam maior e menor quantidade de N total, as diferenças são bastante pequenas, já que do menor para o maior valor há uma diferença de apenas 0,5 g N/kg de terra. Nota-se pouca variabilidade espacial no mapa, que é coincidente com o valor de coeficiente de variação medido no ponto 4.1 (10,9%).

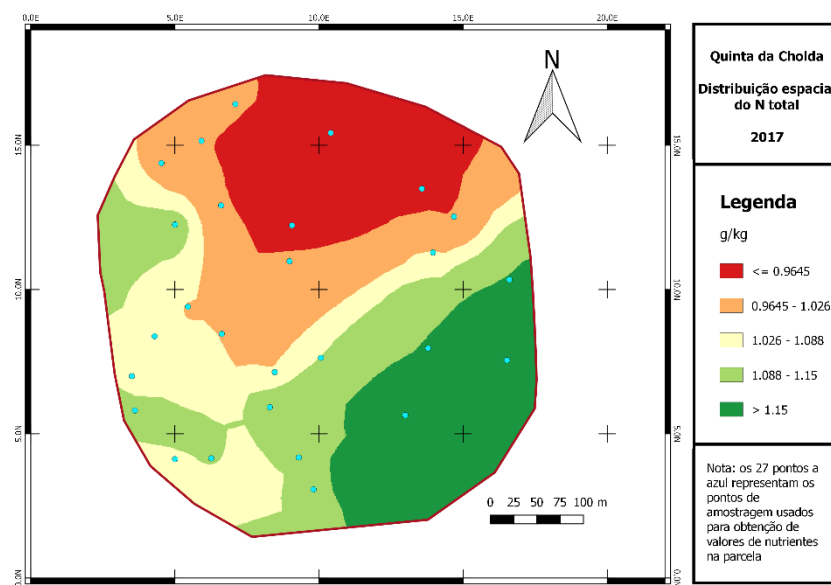


Figura 31. Carta de variabilidade espacial de N expressado em g/kg

Nas figuras 32 e 33 podemos comparar 2 cartas referentes à variabilidade espacial do P obtido por dois métodos distintos. Podemos também destacar um ponto importante: o método Olsen doseou menores quantidades de fósforo do que o método Egner-Riehm, já que se notam mais manchas de baixos teores deste nutriente no método de Olsen comparativamente ao de Egner-Riehm.

Na carta de distribuição espacial do P obtido pelo método de Egner-Riehm (figura 32) podemos observar um nível de fertilidade médio deste nutriente.

Já na figura 33, na qual está representada a distribuição espacial de P obtido pelo método de Olsen, podemos observar um nível de fertilidade baixo a médio.

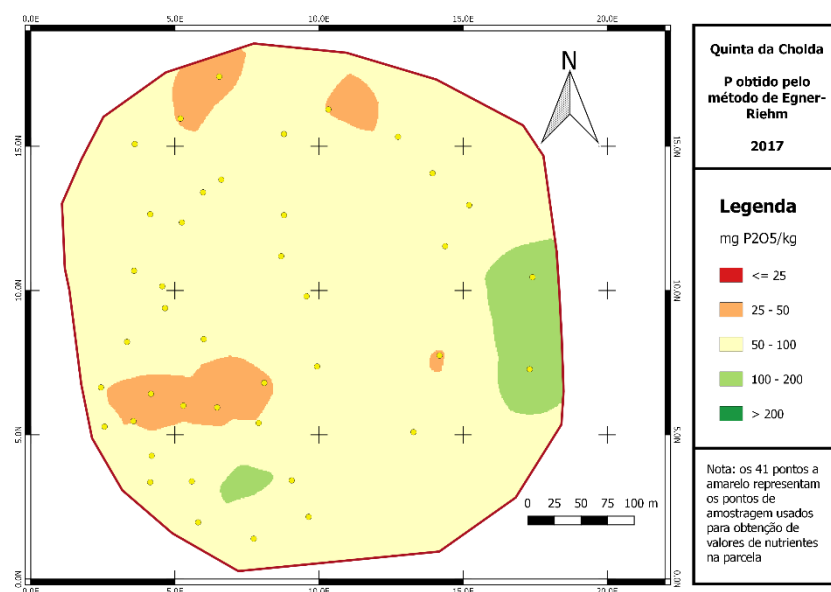


Figura 32. Carta de variabilidade espacial de P expressado em mg P2O5/kg obtido pelo método de Egner-Riehm

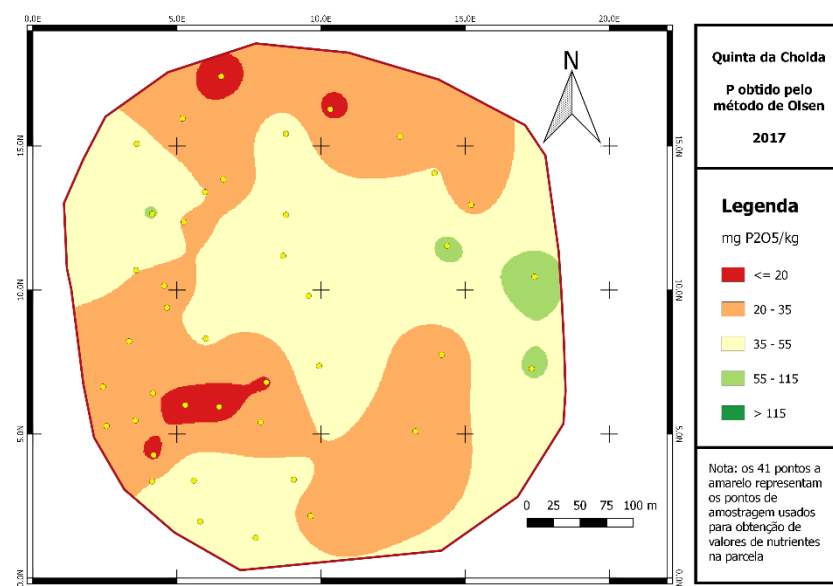


Figura 33. Carta de variabilidade espacial de P expressado em mg P2O5/kg obtido pelo método de Olsen

A figura 34 mostra a variabilidade espacial de K na parcela. Observamos nesta carta que o nível de K existente na parcela é muito alto, já que praticamente toda a parcela contém mais de 200 mg K₂O. Nota-se ainda que é uma parcela bastante homogênea em termos de distribuição espacial deste nutriente, não se verificando manchas muito diferentes ao longo de toda a área.

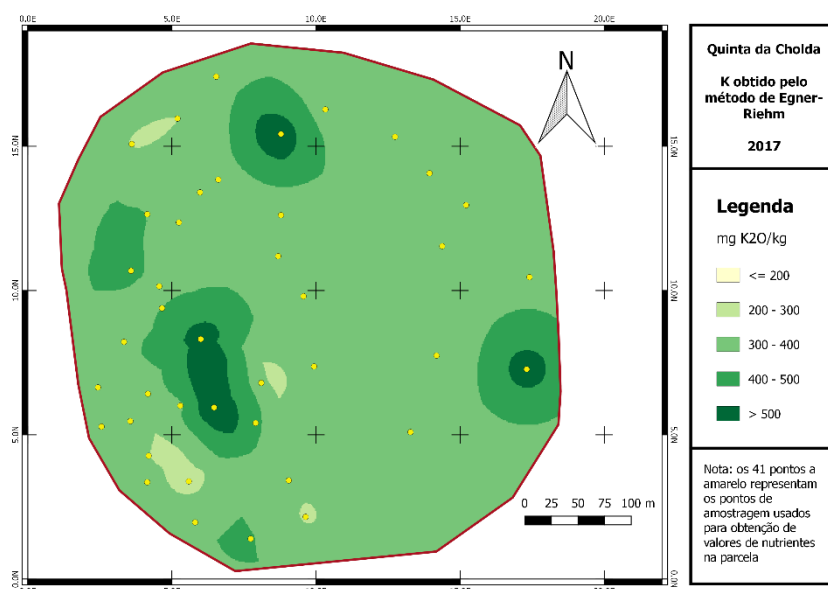


Figura 34. Carta de variabilidade espacial de K expressado em mg K2O/kg obtido pelo método de Egner-Riehm

4.3.2 Micronutrientes

A figura 35 é referente à distribuição espacial do Fe na parcela. Nesta carta podemos observar que o nível de fertilidade deste micronutriente se encontra alto a muito alto. É um dado

importante, já que o milho apresenta alguma sensibilidade ao défice deste nutriente, assim como este se encontra com altos teores nesta parcela, não será um limitante à produtividade.

Será ainda de referir que é uma parcela um pouco heterogénea, já que podemos notar 2 manchas de diferentes teores de Fe: muito alto (>20 mg Fe/kg) na zona este da parcela e noroeste da mesma e alto (entre 15 a 20 mg Fe/kg) na restante área da mesma.

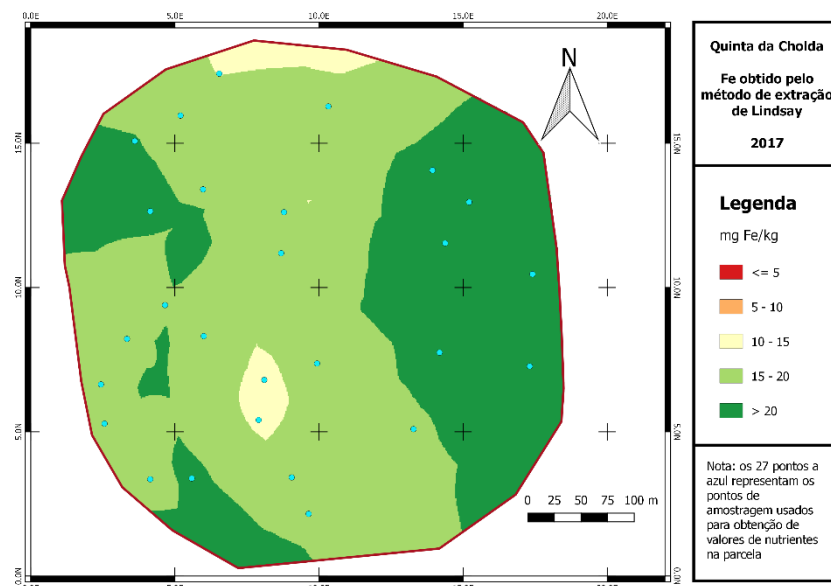


Figura 35. Carta de variabilidade espacial do Fe obtido pelo método de extração de Lindsay e expressado em mg Fe/kg.

Na figura 36 está representada a variabilidade espacial do Mn. O nível de fertilidade deste micronutriente é muito alto, já que praticamente toda a área da parcela contém Mn acima de 30 mg.

É uma parcela homogénea em termos de distribuição espacial, já que se verifica uma mancha de teores muito altos (>30 mg Mn/kg) que cobre grande parte da área, notando-se também uma mancha a norte da parcela na qual os teores de Mn são altos (entre 12 e 30 mg Mn/kg).

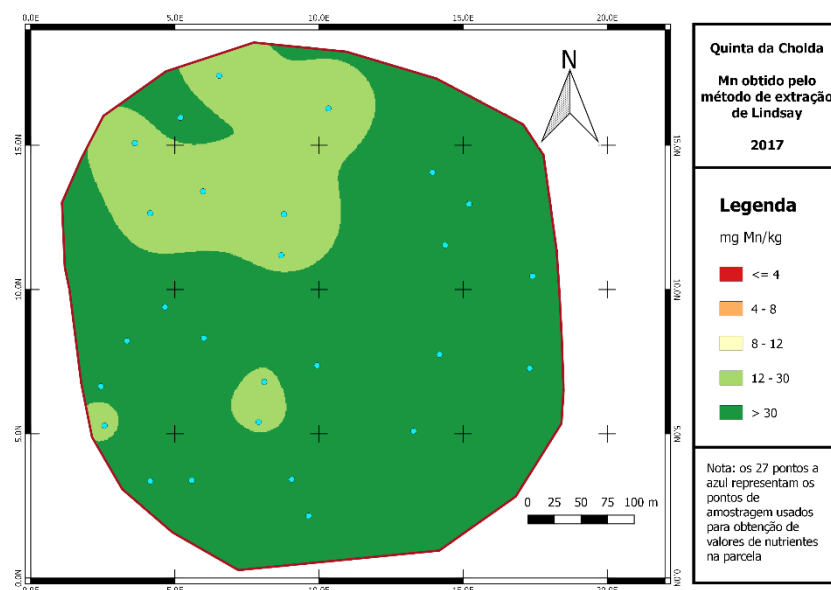


Figura 36. Carta de variabilidade espacial do Mn obtido pelo método de extração de Lindsay e expressado em mg Mn/kg.

A figura 37 representa a variabilidade espacial do Zn. No milho, o Zn é um micronutriente bastante importante já que esta cultura apresenta alta sensibilidade ao déficit do mesmo. Nesta parcela, podemos observar que o nível de fertilidade deste nutriente é baixo a médio, o que pressupõe uma preocupação acrescida, já que baixos teores de Zn poderão afetar a produtividade. Assim sendo, será necessário garantir uma adequada adubação deste micronutriente.

Quanto à distribuição espacial, é uma parcela homogênea, já que em grande parte da sua área se verificam teores médios (entre 1 e 3 mg Zn/kg), notando-se apenas uma pequena mancha de baixos teores (< 1 mg Zn/kg) mais a noroeste da mesma.

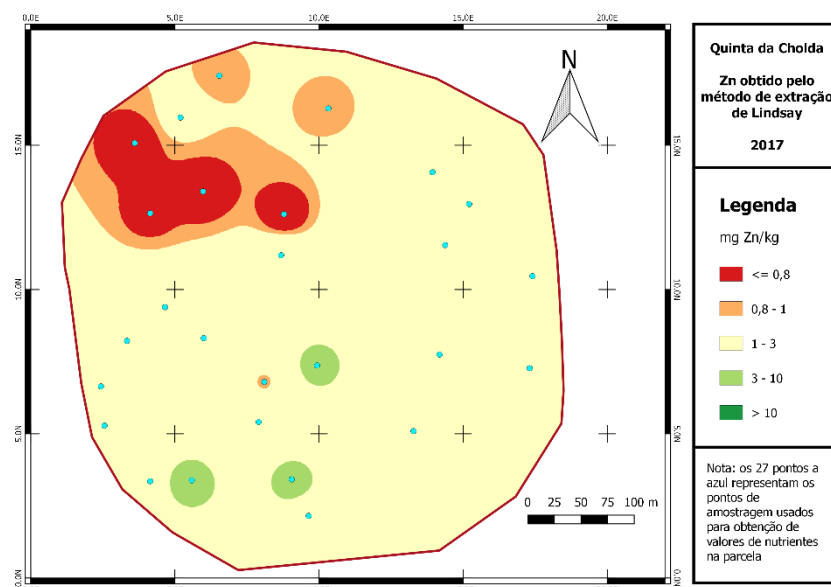


Figura 37. Carta de variabilidade espacial do Zn obtido pelo método de extração de Lindsay e expressado em mg Zn/kg.

A variabilidade espacial do B está representada na figura 38. É visível, através da observação da carta, 2 diferentes manchas de teores deste nutriente. Uma mancha a norte da parcela e que cobre mais de metade da mesma, onde se verificam baixos níveis de fertilidade de B, e uma mancha mais a sul, na qual os níveis de fertilidade são um pouco mais elevados.

É uma parcela bastante heterogênea em termos de distribuição espacial de B, já que se notam diferentes manchas de diferentes teores ao longo de toda a área da mesma.

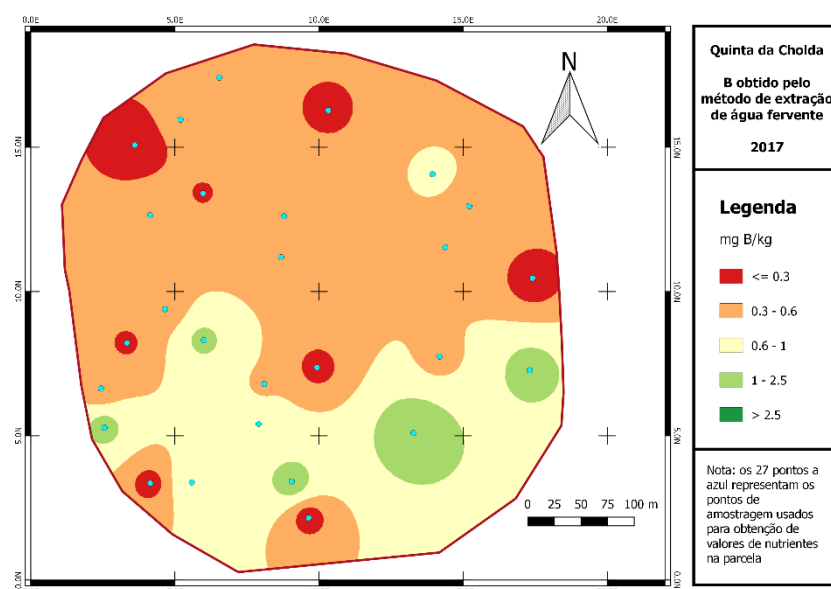


Figura 38. Carta de variabilidade espacial do B obtido pelo método de extração de água fervente e expressado em mg B/kg.

A figura 39 apresenta a variabilidade espacial do Cu na parcela. Observando a distribuição espacial da parcela, nota-se uma mancha de teores de cobre abaixo de 1 mg Cu/kg, ou seja,

baixos teores deste micronutriente, na maior parte da parcela, toda a zona norte da mesma. A sul da parcela nota-se uma mancha de teores altos (entre 1,5 e 5 mg Cu/kg). Assim sendo, e através da observação da parcela, podemos constatar que esta é bastante heterogénea e contém diferentes manchas de diferentes níveis de fertilidade ao longo de toda a sua área.

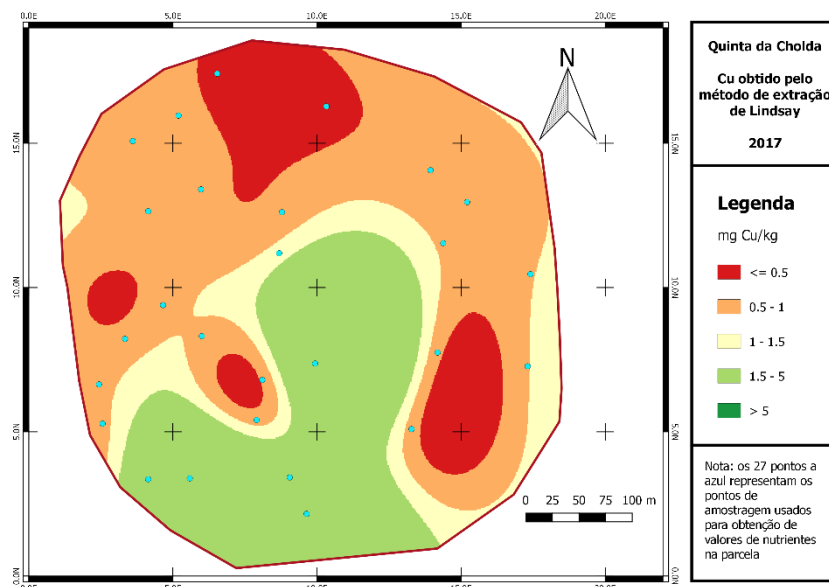


Figura 39. Carta de variabilidade espacial do Cu obtido pelo método de extração de Lindsay e expressado em mg Cu/kg.

4.3.3 Bases de troca

As figuras 40, 41, 42 e 43 são relativas à variabilidade espacial das bases de troca (Ca, Mg, K e Na) da parcela em estudo.

Das bases de troca as mais importantes são o Ca e o Mg. Estas estão relacionadas uma com a outra como podemos comprovar pela semelhança das cartas destas variáveis. Ambas apresentam manchas a encarnado nos mesmos locais (a nordeste, noroeste e sul) da parcela e uma mancha verde que é coincidente (a este da parcela).

Outras variáveis que estão diretamente relacionadas são o Na e a condutividade elétrica (figura 21). A elevada condutividade elétrica é indicador de elevada presença de sais (Na) no solo. Como é visível no mapa, as manchas das cartas destes dois parâmetros apresentam

algumas semelhanças (a mancha encarnada a sul é semelhante nos dois mapas e a mancha verde a norte também é algo parecida).

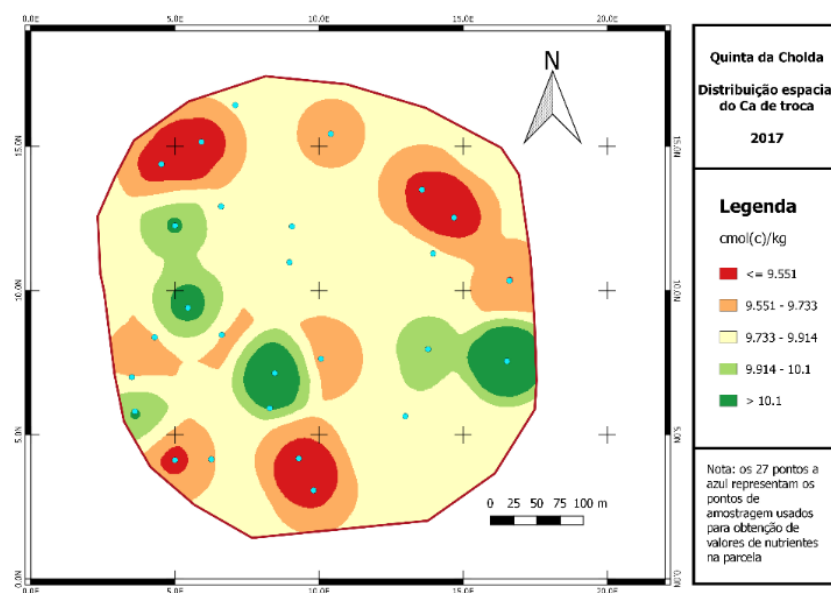


Figura 40. Carta de variabilidade espacial do Ca de troca expressado em cmol(c)/kg.

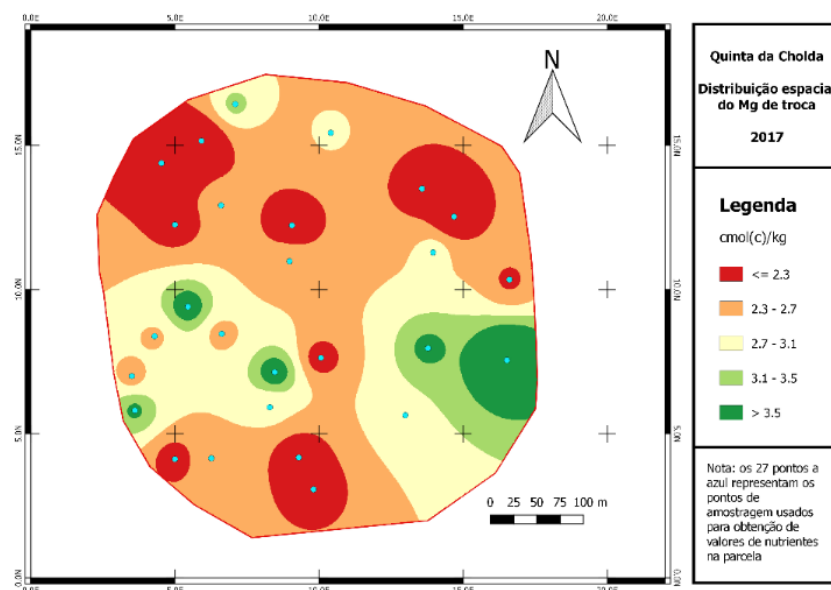


Figura 41. Carta de variabilidade espacial do Mg de troca expressado em cmol(c)/kg.

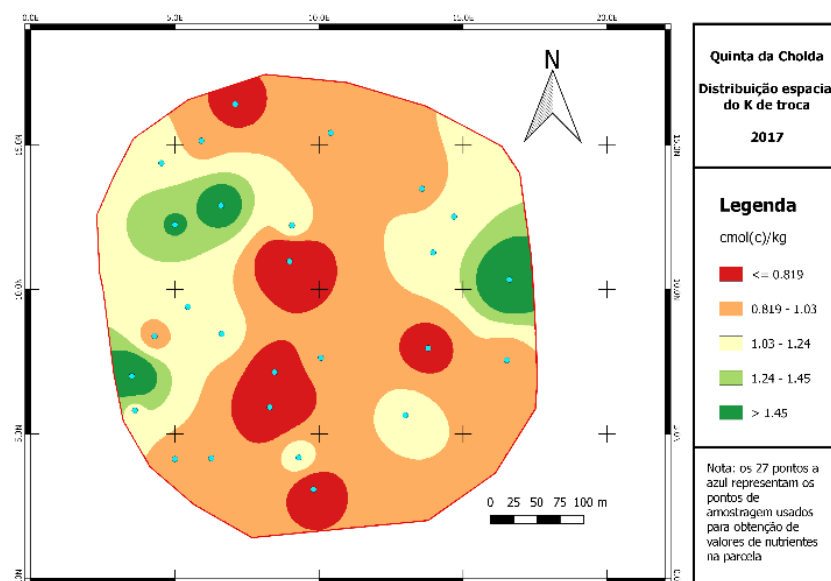


Figura 42. Carta de variabilidade espacial do K de troca expressado em cmol(c)/kg.

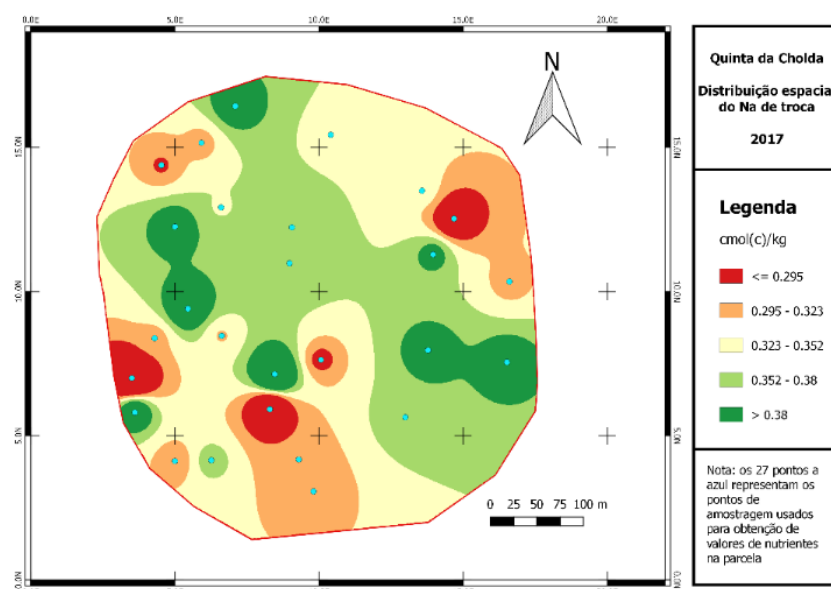


Figura 43. Carta de variabilidade espacial do Na de troca expressado em cmol(c)/kg.

4.3.4 Matéria Orgânica e relação C/N

As cartas 44 e 45 referem-se à distribuição espacial da % de matéria orgânica e à distribuição espacial da relação entre C/N, respetivamente. É importante comparar estas duas variáveis porque estão diretamente relacionadas; a relação entre C/N revela-nos o grau de evolução da matéria orgânica, ou seja, o seu estado de humificação. Quanto maior o estado de humificação, mais estável é a matéria orgânica.

O parâmetro relação C/N, indica-nos a quantidade de unidades de N necessárias para decompor uma unidade de C. Assim sendo, quanto maior a relação C/N, mais unidades de N

serão necessárias para decompor uma unidade de C e, como é de esperar, é necessário mais tempo de decomposição, para além de que esta decomposição poderá ser incompleta.

Como podemos observar, grande parte da parcela apresenta uma relação C/N adequada (figura 45), o que nos poderá revelar que a matéria orgânica existente, ainda que com uma percentagem média a baixa, será estável.

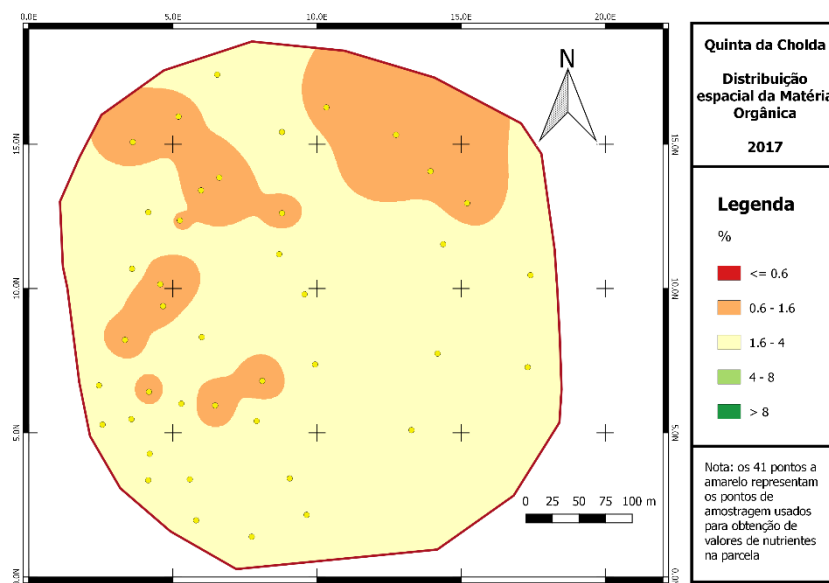


Figura 44. Carta de variabilidade espacial da % matéria orgânica no solo.

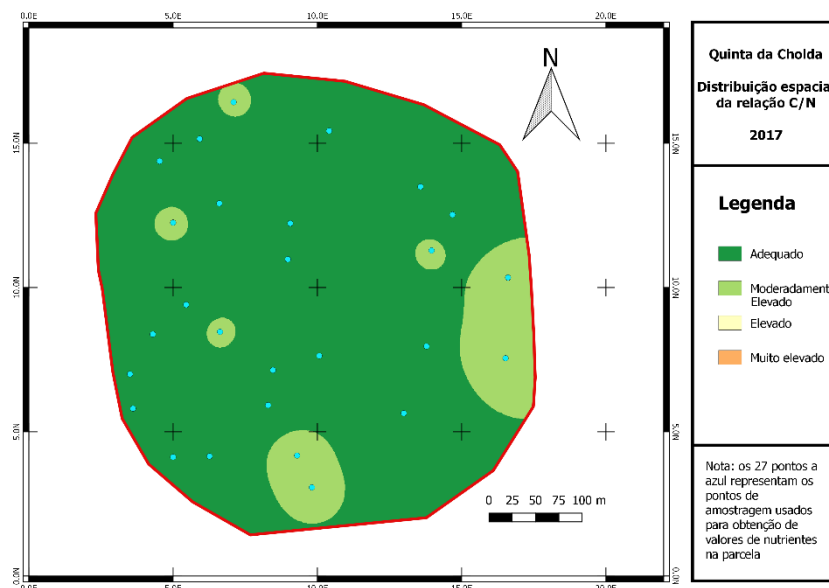


Figura 45. Carta de variabilidade espacial da relação entre o C e o N.

4.3.5 pH

As cartas 46 e 47 apresentam a distribuição espacial do pH em água e do pH em KCl, respetivamente. Podemos verificar que ambas as cartas são homogêneas em termos de distribuição espacial. No caso do pH em água, a classe apresentada é neutra (entre 6,5 e 7,5

de pH) e no caso do pH em KCl, há 2 classes, a maior parte da área da parcela é moderadamente ácida (entre 5,5 e 6,5 de pH) e vêm-se 4 pequenas manchas de pH neutro (entre 6,5 e 7,5 de pH).

É importante comparar estes dois parâmetros porque podem revelar presença de alumínio de troca, quando ambos estão abaixo de 6 e o pH em KCl for menor que o pH em água.

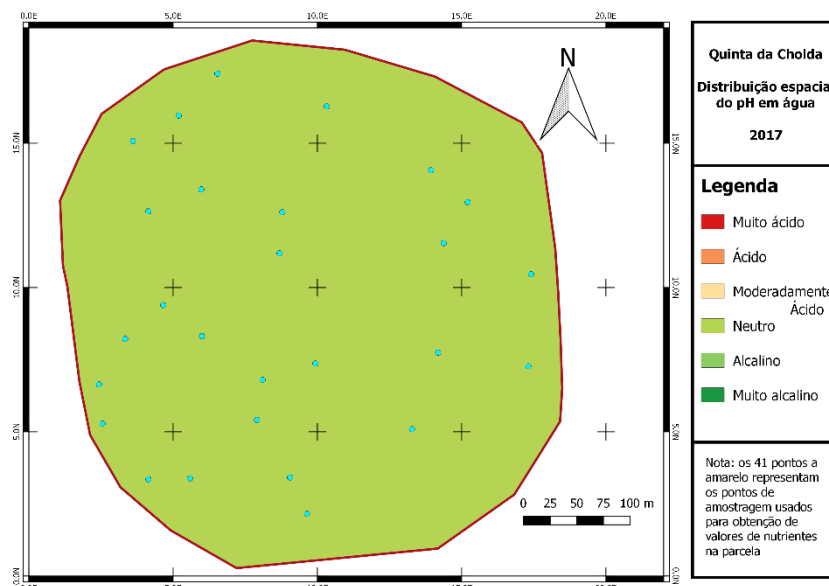


Figura 46. Carta de distribuição espacial do pH em água.

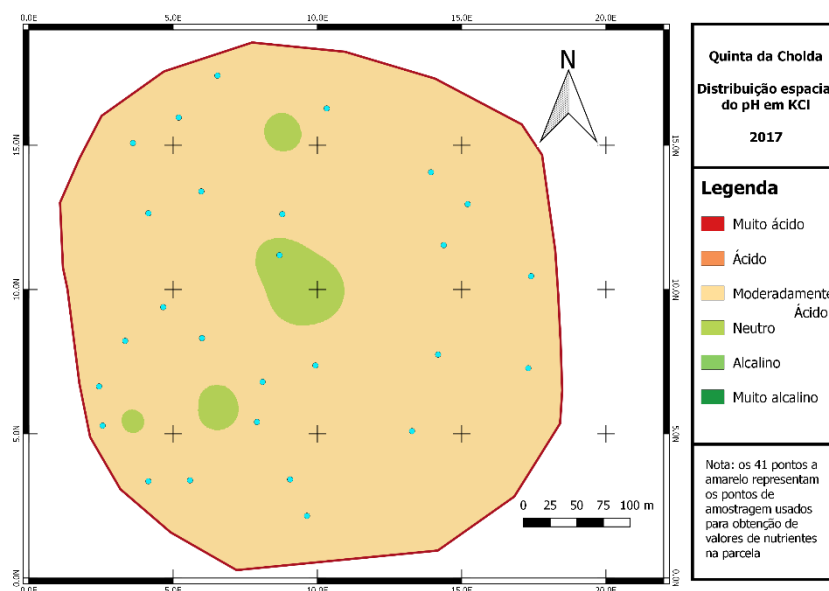


Figura 47. Carta de distribuição espacial do pH em KCl.

4.3.6 Variograma

De cada variável interpolada através de *kriging*, obteve-se um variograma. Este mostra a distância máxima em que os valores ainda apresentam correlação. No quadro 14 estão representados os valores de cada parâmetro do variograma de cada variável. A % de

dependência espacial é calculada através da equação (a verde estão os valores das variáveis que apresentam forte dependência espacial, abaixo de 25%, a azul os de moderada dependência espacial, entre 25 e 75%, e a encarnado os que têm fraca dependência espacial, acima de 75%):

$$GD (\%) = \frac{\text{patamar}}{(\text{patamar} + \text{efeito pepita})} \times 100$$

Quadro 14. Valores de cada parâmetro dos variogramas das variáveis.

	N total	P (ER)	P (Ols)	K	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Ca troca	Mg troca	K troca	Na troca
Nugget (efeito pepita)	63,5	326,5	16,9	1997,6	20,9	83,2	3938,5	1443,8	0,2	7,8	9,4	104,0	79,7
Range (patamar)	66,1	704,2	221,7	7484,2	44,1	176,7	5998,4	118,0	1,2	1,4	51,0	305,6	13,7
Sill (alcance) (m)	291,3	83,2	47,0	61,7	258,3	48,8	203,0	33,0	89,9	58,0	51,4	83,7	33,0
Dependência espacial (%)	49,0	31,7	7,1	21,1	32,2	32,0	39,6	92,4	14,1	85,1	15,6	25,4	85,3

Dos valores apresentados no quadro 14 podemos destacar algumas informações importantes. Os valores referentes ao nugget (efeito pepita) representam a variabilidade existente. Quando o nugget apresenta valores muito elevados, é sinal de que grande parte da variabilidade encontrada é devido a uma distância entre pontos de amostragem mais elevada do que o suposto.

O valor de alcance depende da variável e mede a distância a partir da qual os valores deixam de estar correlacionados, ou seja, deixam de estar espacialmente dependentes. Assim sendo, podemos referir que se a malha de amostragem considerasse este valor, os dados obtidos representariam melhor a realidade da parcela.

4.4. Relação entre produtividade, condutividade e perfis de solo analisados

Com o intuito de verificar quais as características físicas do solo limitantes à produtividade, comparou-se esta variável com as texturas e massas volúmicas aparentes em cada perfil de solo amostrado. As massas volúmicas aparentes dão-nos uma ideia do nível de compactação do solo, quanto maior a massa volúmica aparente, maior é a compactação de um solo. A elevada compactação de um solo pode ser um fator limitante à produtividade, uma vez que dificulta a penetração das raízes, impedindo-as de explorar um maior volume de solo que lhes

poderá proporcionar uma maior absorção de nutrientes e água, elementos essenciais ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Nos quadros 15, 16 e 17 figuram as texturas, densidades e produtividade relativas a cada perfil aberto de solo.

O perfil 1 foi aberto na zona mais produtiva da parcela (entre 18 e 26 ton/ha) e apresenta condutividade elétrica média (entre 19,8 e 24,9 mS/m).

Ao longo de todo o perfil a textura é arenosa, com predomínio de areia fina (quadro 15). A elevada compactação, nota-se logo a partir dos 20 cm com o aumento da massa volúmica aparente, e a redução da porosidade total. Existe maior proporção de microporos porque existe bastante areia fina, mas sobretudo por existir elevada compactação e, portanto, a porosidade total é reduzida (47,92% no 1º horizonte; 32,83% no 2º horizonte; 35,47% no 3º horizonte).

Podemos constatar então que a principal característica física limitante neste perfil é a elevada compactação, que resulta numa redução da % total de poros e torna difícil o crescimento das raízes. Uma vez que não há arejamento, há pouco oxigénio e dificuldade na expansão radicular, as plantas tornam-se mais suscetíveis ao stress hídrico devido à carência de água e podem perder potencial produtivo devido à baixa absorção de nutrientes.

Quadro 15. Quadro relativo às texturas, massas volúmicas aparentes, % de porosidade, teores de nutrientes e produtividade relativas ao perfil 1 e respetivos horizontes amostrados.

Profundidade do horizonte (cm)		(0 - 20)	(20 - 45)	(45 - 62)	(62 - 104)	(104 - 160)
Teores	A.G (%)	10,3	10,0	7,3	24,4	17,1
	A.F (%)	41,3	39,4	38,0	40,9	47,6
	L (%)	25,5	22,3	22,5	18,1	19,1
	A (%)	22,8	28,3	32,2	16,7	16,3
	MVap (g/cm ³)	1,38	1,78		1,71	
	Poros (%)	47,92	32,83		35,47	
	N			médio		
	P (E-R)			médio		
	K			muito alto		
	Fe			alto		
	Mn			muito alto		
	Zn			médio		
	B			baixo		
	Cu			baixo		
	% MO			médio		
	Produtividade (ton/ha)			18-26		

O perfil 2 foi aberto numa zona onde há uma mancha de condutividade elétrica mais elevada (entre 40.3 e 45.5 mS/m) e coincide com uma mancha de baixa produtividade (abaixo das 14 ton/ha).

Apresenta uma textura mais argilosa na parte menos profunda do perfil (0 – 100 cm) e na parte mais profunda do mesmo transita para uma textura mais arenosa (100 – 170 cm) (quadro 16). O efeito da compactação, dado pela massa volúmica aparente, nota-se logo a partir dos 15 ou 20 cm de profundidade e a redução da % total de poros é sinal disso.

Podemos constatar que o perfil 2 corresponde à zona de menor produtividade porque dos 3 perfis é aquele que apresenta maior teor de argila nos horizontes. Além disso, predomina a microporosidade pelo facto de que, embora a massa volúmica aparente seja mais baixa no 2º horizonte deste perfil do que nos 2º horizontes dos outros perfis, significando que a porosidade total é maior, como este perfil é mais argiloso, tem com certeza maior proporção de microporos.

Quadro 16. Quadro relativo às texturas, massas volúmicas aparentes, % de porosidade, teores de nutrientes e produtividade relativas ao perfil 2 e respetivos horizontes amostrados.

Profundidade do horizonte (cm)		(0 - 15)	(15 - 50)	(50 - 100)	(100 - 150)	(150 - 170)
Teores	A.G (%)	7,7	7,6	0,6	2,7	67,8
	A.F (%)	30,9	30,6	25,1	42,0	13,8
	L (%)	25,6	26,0	34,7	27,6	4,8
	A (%)	35,8	35,8	39,6	27,6	13,6
	MVap (g/cm ³)	1,25	1,63			
	Poros (%)	52,83	38,49			
	N			médio		
	P (E-R)			médio		
	K			muito alto		
	Fe			alto		
	Mn			alto		
	Zn			médio		
	B			médio		
	Cu			baixo		
	% MO			médio		
	Produtividade (ton/ha)			< 14		

O perfil 3 foi aberto numa zona de produtividade intermédia (entre 14 e 17 ton/ha) que coincide com uma baixa condutividade elétrica (entre 4,4 e 9,5 mS/m). À semelhança dos locais dos outros perfis, esta é uma zona onde os teores de nutrientes são, no geral, baixos (quadro 17).

É um perfil bastante semelhante ao perfil 1 em termos texturais, e em termos de compactação, uma vez que a massa volúmica aparente é elevada e a porosidade total é reduzida no 2º e 3º horizontes (35,85% no 2º horizonte e 38,11% no 3º horizonte). A compactação deste perfil deverá ser menor em relação ao perfil 1, porque apresenta menor teor em argila.

Podemos constatar então que a principal característica física limitante neste perfil é tal como no perfil 1 é a elevada compactação, que resulta numa redução da % total de poros e torna difícil o crescimento das raízes.

Quadro 17. Quadro relativo às texturas, massas volúmicas aparentes, % de porosidade, teores de nutrientes e produtividade relativas ao perfil 3 e respetivos horizontes amostrados.

	Profundidade do horizonte (cm)	(0 - 20)	(20 - 50)	(50 - 100)	(100 - 150)
Teores	A.G (%)	20,4	20,8	16,9	17,9
	A.F (%)	47,9	47,6	39,7	40,4
	L (%)	18,9	21,3	26,8	17,3
	A (%)	12,8	10,2	16,5	24,4
	MVap (g/cm³)	1,31	1,7	1,64	
	Poros (%)	50,57	35,85	38,11	
	N			médio	
	P (E-R)			médio	
	K			muito alto	
	Fe			alto	
	Mn			alto	
	Zn			baixo	
	B			baixo	
	Cu			baixo	
	% MO			médio	
	Produtividade (ton/ha)		14 - 17		

4.5. Cartas de prescrição

Todas as recomendações foram calculadas tendo como meta uma produção esperada de 17 ton/ha. Assim sendo, os mapas apresentados em seguida têm como meta esse valor.

4.5.1 Macronutrientes principais

As cartas de prescrição dos macronutrientes principais N, P e K estão apresentadas nas figuras 48, 49 e 50, respetivamente.

A recomendação de azoto está representada na figura 48. Sendo que o azoto é um nutriente fundamental para o milho, torna-se essencial fazer uma adubação correta deste nutriente. Como antes referido, o teor adequado de azoto é de 20 kg/ha para uma produtividade superior a 12 ton/ha (neste caso a produtividade esperada é 17 ton/ha), a adubação recomendada é a referida na figura ($17 \times 20 = 340$ kg/ha).

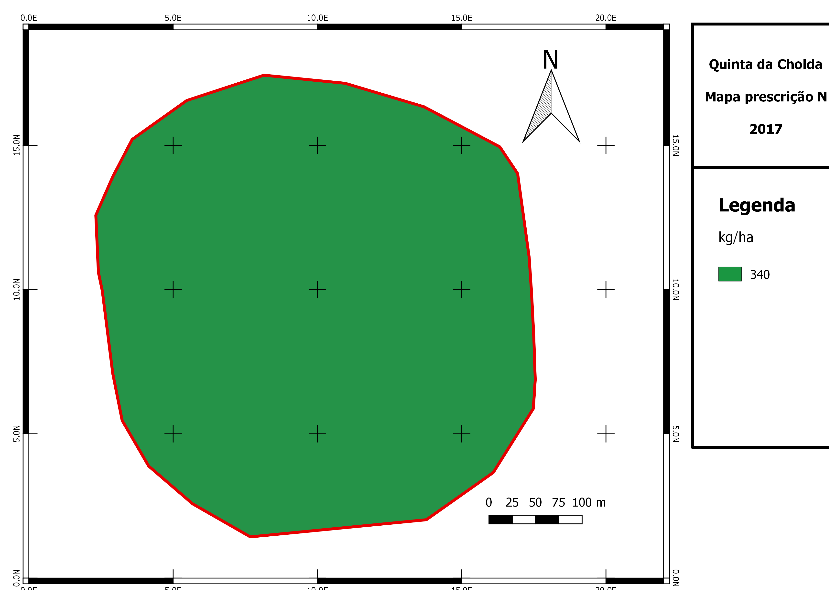


Figura 48. Mapa de prescrição de azoto em kg/ha.

Na figura 49 está representada a prescrição de P para a parcela em estudo. Os valores mais elevados, representados a verde, coincidem com os teores mais baixos de P_2O_5 na parcela e as recomendações com valores mais baixos, a laranja, com os teores mais elevados de P_2O_5 . Como a extração média deste nutriente para o milho é 60-110 kg P_2O_5 /ha, a recomendação de fertilização é mais elevada que o necessário para a cultura, porque o coeficiente de utilização da cultura para este nutriente é de cerca de 20%. O que quer dizer que 80% do total de P_2O_5 existente no solo não é absorvido pela planta porque este é um nutriente pouco solúvel e pode ser retido facilmente no solo, ficando assim indisponível à planta.

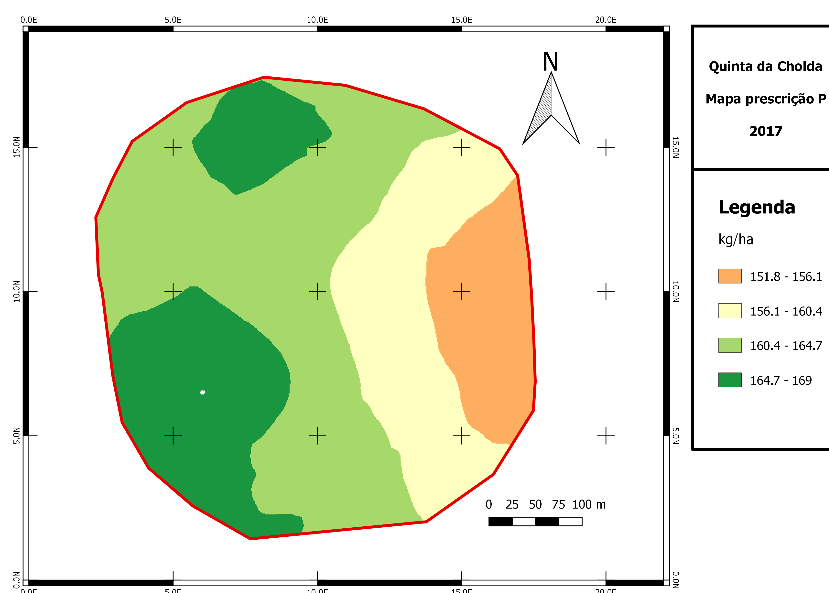


Figura 49. Mapa de prescrição de fósforo em kg/ha.

A figura 50 apresenta a recomendação de fertilização de K para a parcela. A extração média deste nutriente para o milho é 110-230 kg K_2O /ha, mas a recomendação é mais elevada do que a quantidade que a cultura extrai porque o coeficiente de utilização é de cerca de 40%. Quer isto dizer que 60% do total de K_2O existente no solo não é absorvido pela planta porque liga-se facilmente às argilas, ficando assim indisponível à planta.

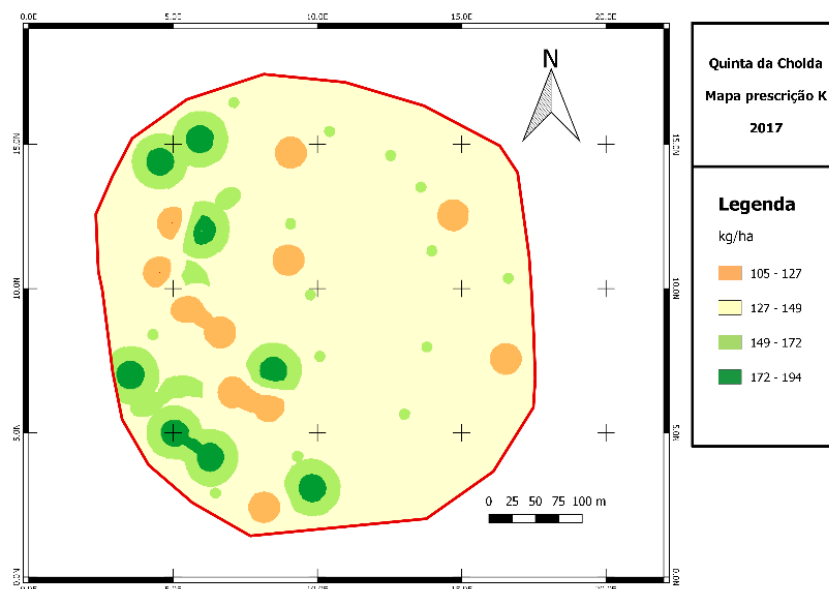


Figura 50. Mapa de prescrição de potássio em kg/ha.

4.5.2 Macronutrientes secundários

A carta de prescrição do macronutriente secundário (Mg) está apresentada na figura 51. A extração média deste nutriente é de 40-80 kg Mg/ha, valor que é recomendado na carta de prescrição mostrada abaixo.

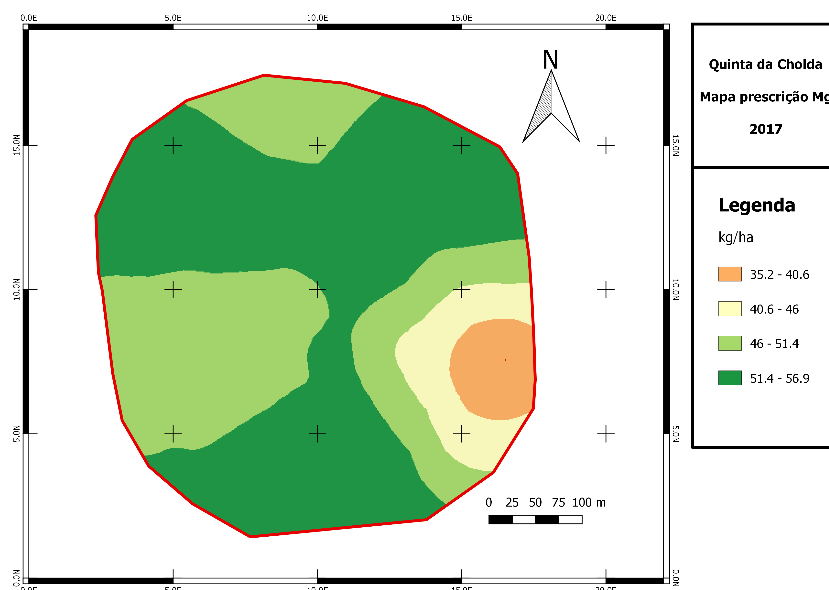


Figura 51. Mapa de prescrição de magnésio em kg/ha.

4.5.3 Micronutrientes

As cartas de prescrição dos micronutrientes Fe, Mn, Zn, B e Cu estão apresentadas nas figuras 52, 53, 54, 55 e 56 respetivamente.

A figura 52 representa a recomendação de fertilização de Fe na parcela em estudo. Os valores mais elevados, a verde, coincidem com os teores mais baixos de Fe na parcela e as recomendações com valores mais baixos, a laranja, com os teores mais elevados de Fe. A extração média deste nutriente para o milho é de 1-2,1 kg Fe/ha, valor que é recomendado na carta representada em baixo.

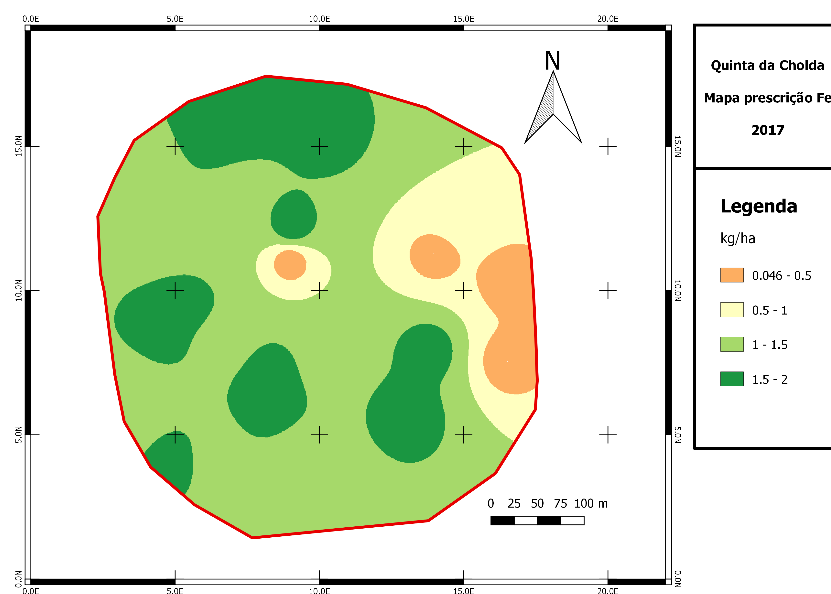


Figura 52. Mapa de prescrição de ferro em kg/ha.

A figura 53 representa a recomendação de fertilização de Mn para a parcela. Os valores de recomendação mais elevados são coincidentes com os teores mais baixos de Mn na parcela e as recomendações com valores mais baixos, com os teores mais elevados deste nutriente. A extração média deste nutriente para o milho é de 0,34-0,75 kg Mn/ha e como a parcela apresenta um baixo teor de Mn no solo (abaixo do adequado), é necessária uma recomendação mais elevada do que o que a planta extrai. Além disso, o milho é algo sensível ao défice deste nutriente.

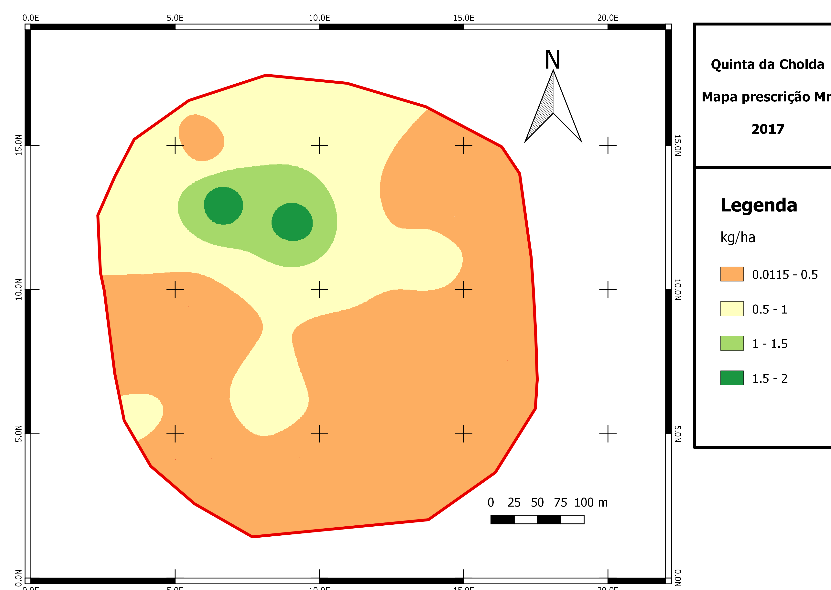


Figura 53. Mapa de prescrição de manganês em kg/ha.

A figura 54 mostra a recomendação de fertilização de Zn na parcela. Os valores mais elevados de recomendação coincidem com os teores mais baixos de Zn na parcela e as recomendações com valores mais baixos, a encarnado, com os teores mais elevados de Zn. A extração média deste nutriente para o milho é de 0,38-0,7 kg Zn/ha, mas como o teor deste nutriente está bastante abaixo do adequado, a sua recomendação é mais elevada. Para além disso o milho apresenta alta sensibilidade ao défice deste nutriente, pelo que é necessário garantir uma adubação adequada do mesmo.

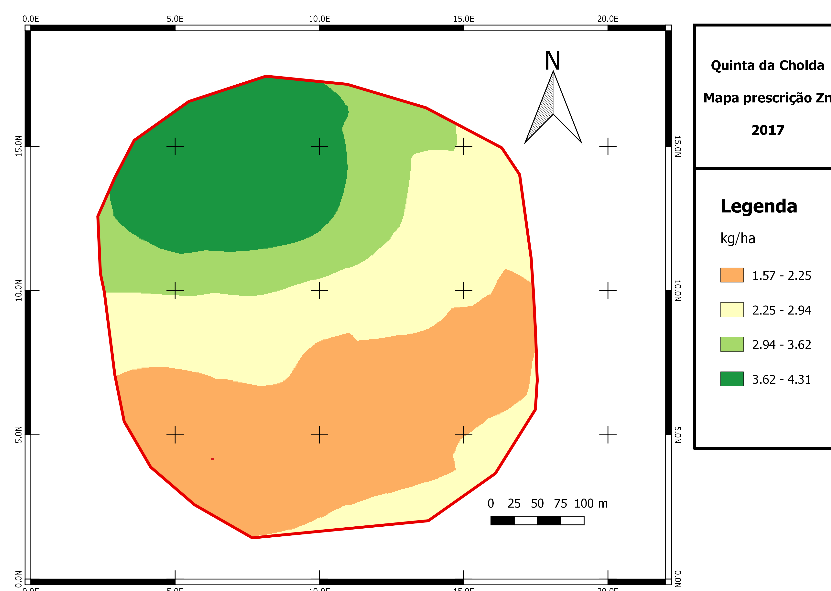


Figura 54. Mapa de prescrição de zinco em kg/ha.

A recomendação de fertilização de B está representada na figura 55. As manchas a laranja representam zonas onde o teor de B é mais elevado, pelo que necessitam de menor quantidade de B e as manchas a verde são zonas onde o teor deste nutriente é mais baixo e

necessitam de maior quantidade de B. A sua extração média para o milho é 0,1-0,2 kg B/ha mas o seu teor na parcela encontra-se bastante abaixo do adequado, razão pela qual a recomendação é elevada, de forma a repô-lo no solo para que e ao mesmo tempo suprir as necessidades da planta.

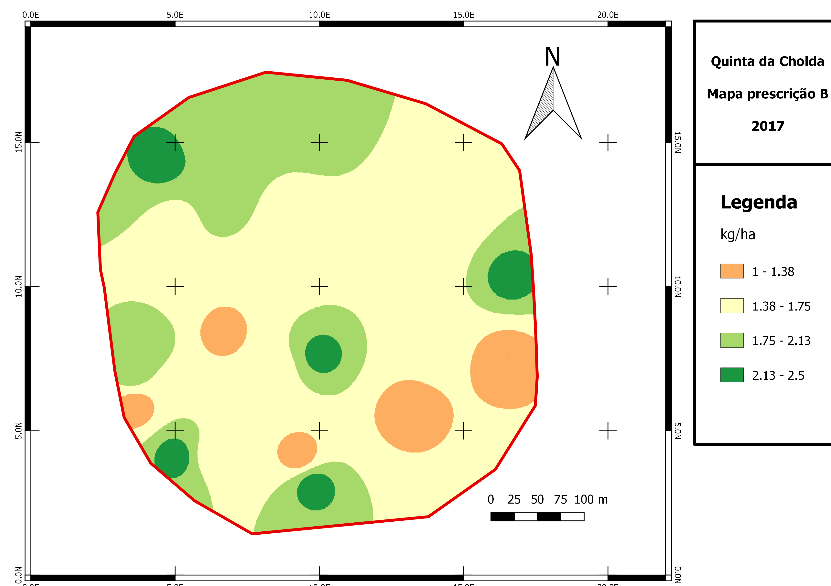


Figura 55. Mapa de prescrição de boro em kg/ha.

A recomendação de Cu está apresentada na figura 56. As manchas a verde representam maiores teores de recomendação de Cu, o que significa que são locais onde há teores mais baixos deste nutriente. A laranja estão os maiores teores de recomendação deste nutriente que significam teores mais elevados do mesmo na parcela. O milho extrai cerca de 0,1 kg Cu/ha, mas como os teores deste nutriente na parcela estão bastante abaixo do adequado, é necessário adubar em maior quantidade. Para além disso, o milho é algo sensível ao défice deste nutriente, pelo que se torna importante não só responder às necessidades da planta, como também repor o seu teor no solo.

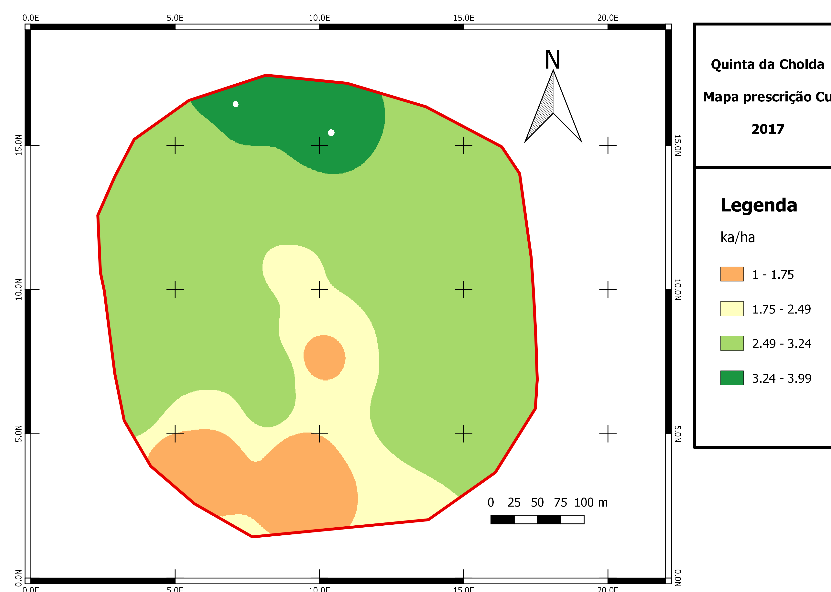


Figura 56. Mapa de prescrição de cobre em kg/ha.

5. Conclusões

O primeiro objetivo deste estudo era avaliar e caracterizar a variabilidade espacial da fertilidade de uma parcela de milho. Após a análise, pode-se concluir que a variabilidade espacial difere de acordo com os nutrientes estudados, sendo mais elevada nos casos do boro e cobre e um pouco mais reduzida para o fósforo, zinco, manganês e ferro. Deste modo, a medição da variabilidade espacial e o mapeamento de uma parcela, torna-se uma ferramenta bastante útil ao agricultor, permitindo que este atue de forma mais precisa.

Concluiu-se também que os nutrientes se encontram, de um modo geral, em níveis de teores médios. Nos casos do K, Fe e Mn, os teores apresentados estão num nível muito alto. O P (obtido pelo método de Egner-Riehm) está num nível médio de fertilidade. Os nutrientes P (obtido pelo método de Olsen), Zn, B e Cu apresentam no seu geral, baixos a médios níveis de fertilidade.

O segundo objetivo era aferir os fatores edáficos limitantes à produtividade. Depois de comparadas, através de uma matriz de correlações, a distribuição dos nutrientes com a produtividade, podemos concluir que os nutrientes que mais influenciam a produtividade são os micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn) porque apresentam maiores valores de correlação com a produtividade (39%, 56%, 36% e 48% respetivamente) e os seus mapas são semelhantes (verificam-se manchas de maior teor destes nutrientes onde a produtividade é mais elevada e manchas onde os teores são mais baixos e coincidem com zonas de produtividades mais elevadas). Quer isto dizer que a produtividade depende muito dos micronutrientes, que são nutrientes absorvidos em menor quantidade, mas podem ser limitantes caso estejam em défice.

A produtividade apresenta ainda correlações interessantes com as classes granulométricas: - 36% de correlação com a argila, - 49% de correlação com a areia grossa e 33% de correlação com a areia fina. Quer isto dizer que o teor de argila e areia grossa afetam negativamente a produtividade.

Concluiu-se também que a abertura de perfis no solo e análise dos horizontes de cada perfil é de grande utilidade para o conhecimento mais aprofundado das características físicas do solo, que podem ser grande parte das vezes, limitantes à produtividade.

Na ótica da funcionalidade prática para o agricultor, este trabalho gerou alguns pontos interessantes. Percebeu-se a importância que a correta escolha dos locais dos pontos de amostragem tem, para uma avaliação mais precisa da variabilidade espacial de qualquer variável de uma parcela. Neste trabalho, a densidade amostral foi de certa forma limitante a uma adequada medição da variabilidade espacial dos nutrientes, já que havia locais da

parcela com poucos pontos de amostragem, o que torna imprecisa a interpolação espacial dos dados. A malha de amostragem deve ser escolhida com base na análise dos variogramas das variáveis, nomeadamente tendo em conta os parâmetros alcance e efeito pepita.

É importante haver um maior número de amostras nos locais onde as variáveis apresentam valores mais baixos, porque são zonas onde pode haver limitações na parcela e devem ser sinalizadas de forma mais rigorosa. Será também interessante estudar as zonas de maior produtividade, já que estas podem ser um indicador das características edáficas que estão associadas a melhores resultados de produtividade.

6. Bibliografia

- ADP Fertilizantes, S.A. (2010). *Culturas: milho*. <http://www.adp-fertilizantes.pt/templates/template4det.aspx?M=124&F=42&L=43&C=928>.
- Aimrun, W.; Amin, M.; Ezrin, M. (2009). Small Scale Spatial Variability of Apparent Electrical Conductivity within a Paddy Field. *Applied and Environmental Soil Science*. Volume May 2009.
- ANPROMIS (2017). Associação Nacional de Produtores de Milho e Sorgo, O Milho. <http://www.anpromis.pt/>.
- ArcGis (2017). <https://doc.arcgis.com/pt-br/arcgis-online/reference/geo-info.htm>
- Aronoff, S. (1989). *Geographical Information Systems: A Management Perspective*. Ottawa., WDI Publications.
- Ashraf M., Loftis J. C., Hubbard K. G. (1997). Application of geostatistics to evaluate partial weather station networks. *Agric For Meteorol* 84: 255–271.
- Avery, T.E.; Berlin, G.L. (1992). *Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, US.
- Avillez, F. (2015). *A Agricultura portuguesa*. Fundação Francisco Manuel dos Santos. 114p. Lisboa.
- Azevedo, A. L. (1971). A classificação climática de Köppen. *Agrossilva*, Nova Lisboa. 55-60.
- Barros, José F. C.; Calado, José G. - *A Cultura do Milho*. Évora: Universidade de Évora, Escola de Ciências e Tecnologia, Departamento de Fitotecnia. 2014. Texto de apoio a alunos.
- Berger, K.C.; Troug, K. (1939). Boron determination in soils and plants using the quinalizarin reaction. *Industrial and Engineering Chemistry*, 11: 540-545.
- Bernardi, J.; Landim, P. (2002). Aplicação do Sistema de Posicionamento Global (GPS) na coleta de dados. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 10, 31 pp.
- Borga M., Vizzaccaro A. (1997). On the interpolation of hydrologic variables: formal equivalence of multiquadratic surface fitting and kriging. *J Hydrol* 195: 160–171.
- Braga, R. (2009). *Viticultura de Precisão. Inovação e tecnologia na formação agrícola*. Associação de Jovens Agricultores de Portugal. 84pp.

- Braga, R. (2014). *Entrevista a Ricardo Braga*. Acedido em: 28, Março, 2017, em: <http://www.agronegocios.eu/noticias/entrevista-a-ricardo-braga/>
- Braga, R., e Ul, P. I. S. A. (2016). Solução na inovação: Novo paradigma, (2012).
- Braga, R.; Aguiar Pinto, P. (2011). *Agricultura de precisão: adopção e principais obstáculos*. Agrotec n1: 84-89. Dezembro.
- Campling P., Gobin A., Feyen J. (2001). Temporal and spatial rainfall analysis across a humid tropical catchment. *Hydrol Process* 15: 359–375.
- Capelli, N.L. (1999). Agricultura de precisão - Novas tecnologias para o processo produtivo.
- Cardoso, J. C. (1965). Os solos de Portugal – Sua Classificação, Caracterização e Génese. 1- A sul do rio Tejo. Secretaria de Estado da Agricultura, Direcção geral dos serviços agrícolas. Lisboa. pp. 310.
- Caruso C., Quarta F. (1998). Interpolation methods comparison. *Comput Math Applic* 35(12): 109–126.
- Coelho A.M. (2006). *Nutrição e Adubação do Milho*. 1 ed. Sete Lagoas, Brazil: Embrapa. 10 pp.
- Coelho, A.M. (1995). Efeito de níveis de N na dinâmica de amónio e nitrato em latossolo cultivado com milho irrigado. In: Congresso Nacional De La Ciencia Del Solo, Temuco, Chile.
- Coelho, A.M.; França, G. E. (1991). *Nutrição e adubação do milho forrageiro*. Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. Milho para silagem: tecnologias, sistemas e custo de produção. Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS. p. 29-73.
- Coelho, A.M.; França, G.E.; Pitta, G.V.E.; Alves, V.M.C.; Hernani, L.C. (2006). *Sistemas de Produção 1, Fertilidade de solos, Cultivo do Milho - Nutrição e adubação do Milho*. 2ª edição, Embrapa. Brasil.
- Coelho, J. P. C., e Silva, J. R. M. (2009). *Agricultura de precisão. Inovação e tecnologia na formação agrícola*. Associação de Jovens Agricultores de Portugal, Lisboa. 125 pp.
- Coelho; J.C., Mira da Silva, L.; Tristany, M., Castro Neto, M. e Aguiar Pinto, P. (2004). *Agricultura de Precisão*. Lisboa. 106 pp.

Collins F. C. (1996). A comparison of spatial interpolation techniques in temperature estimation. Third Int Conf Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. January 21–25.

Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1–3 SPEC. ISS.), 11–43.

Cowen, D.J. (1988). SIG versus CAD versus DBMS: what are the differences?, IN: Introductory readings in Geographic Information Systems. Londres.

Doolittle, J.A.; Brevik, E.C. (2014). The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*, 223-225, 33-45.

Égner, H.; Riehm, H.; Domingo, W.R. (1960). Investigations of the chemical soil analysis as a basis for the evaluation of nutrient status in soil. II. Chemical extraction methods for phosphorus and potassium determination. *K Lantbruks Høgsk Ann* 26: 199-215.

Erarslan, K. (2012). Computer Aided Ore Body Modelling and Mine Valuation. <https://doi.org/10.5772/26020>

Fancelli, A.L. (1986). Plantas alimentícias: guia para aula, estudos e discussão. Piracicaba: ESALQ. 131 pp.

FAO 2001 FAOSTAT. <http://apps.fao.org>. FAO, Rome.

Farnham, D. E.; Benson, G. O.; Pearce, R. B. (2003). Corn perspective and culture. American Association of Cereal Chemists, Minnesota, USA, 33pp.

Ferguson, R. B., Hergert, G. W. (2012). Soil Sampling for Precision Agriculture. *Precision Agriculture*. University of Nebraska, Lincoln, NE, USA. (Extension EC 154: 1-4) .

Figueira, T. (1997). A cultura do milho nas regiões da Golegã e Chaves: Estudo dos sistemas de produção e análise económica e social da cultura. Dissertação de mestrado, ISA-UTL, Lisboa.

Fluentes, H.C.; Gonzalez-Martin, I.; Hernandez-Hierro, J.M.; Govaerts, B.; Sayre, K.D.; Ethevers, J. (2012). NIR spectroscopy: Na alternative for soil analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. New York, 43: 346-356.

Friedman, S. (2005). Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46, 45-70.

Geonics Limited (1999). <http://www.geonics.com/html/conductivitymeters.html>

Gupta, U.C. (1967). A simplified method for determining hot-water soluble boron in Podzols soils. *Soil Science*, 103: 424-428.

Investigations, C. S. Energy: The Driver of Climate.

IUSS Working Group WRB (2006). *World reference base for soil resources*. 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.

Johnson, C. K.; Mortensen, D.A.; Wienhold, B.J.; Shanahan, J.F.; Doran, J.W. (2003). Site-Specific Management Zones Based on Soil Electrical Conductivity in a Semiarid Cropping System. *Agron. J.* 95: 303-315.

Johnson, C.K.; Eskridge, K.M.; Corwin, D.L. (2005) - Apparent soil electrical conductivity: applications for designing and evaluating field-scale experiments. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 181-202.

Johnston K., Ver Hoef J. M., Krivoruchko K., Lucas N. (2001). Using ArcGIS Geostatistical Analyst. ESRI, Redlands, CA.

Keen, B.; Raczkowski, H. (1921). The relation between the clay content and certain physical properties of a soil. *The Journal of Agricultural Science*, 11(4): 441-449.

King, J.; Dampney, P.; Lark, R.; Wheeler, H.; Bradley, R. e Mayr, T. (2005) - Mapping potential crop management zones within fields: use of yield-map series and patterns of soil physical properties identified by electromagnetic induction sensing. *Precision Agriculture* 6: 167-181.

Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A.; Drummond, S.T. (1999). Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils. *Journal of Production Agriculture*, v. 12, nº4: 607-617.

Lencastre, A. Hidráulica Geral. (1983), 645 pp.

Lindsay, W.L.; Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron manganese and copper. *Soil Science Society of American Journal*, 42: 421-428.

Long, D.S. (1998). Spatial autoregression modeling of site-specific wheat yield. *Geoderma* 85: 181–197.

Lund, E.D.; Wolcott, M.C.; Hanson, G.P. (2001). Applying nitrogen site-specifically using soil electrical conductivity maps and precision agriculture technology. *Scientific World*, 1: 767-776.

Maleki, M.; Mouazen, A.; Ramon, H. e Baerdemaeker, J. (2007) - Optimisation of soil VIS-NIR sensor- based variable rate application system of soil phosphorus. *Soil & Tillage Research* 94, n. 1: 239-250.

Mallarino, A.P. e Wittery, D.J. (2004) - Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. *Precision Agriculture* 5: 131-144.

Manzatto, C.V.; Bhering, S.B.; Simões, M. (1999). Agricultura de Precisão: Propostas e ações da embrapa Solos. EMBRAPA Solos.

McCormick, S.; Jordan, C. e Bailey, J. (2009) - Within and between-field spatial variation in soil phosphorus in permanent grassland. *Precision Agriculture* 10: 262-276.

Mertens, F.M.; Paetzold, S.; Welp, G. (2008). Spatial heterogeneity of soil properties and its mapping with apparent electrical conductivity. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(2), 146-154.

Nalder I. A., Wein R. W. (1998). Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agric For Meteorol* 92: 211–225.

National Geographic. <https://www.nationalgeographic.com/>.

Oliver, M. A. (2010). *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Springer Netherlands.

Olsen, S.R.; Cole, C.V.; Watenabe, F.S.; Dean, L.A (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Washington: USDA. 22 pp.

Ozemoy, V. M.;Smith, D. R.; Sicherman, A. (1981). Evaluating computerized geographic information systems using decision analysis. *Interfaces*.

Parker, D.R.; Gardner, E.H. (1981). The determination of hot-water-soluble boron in some acid Oregon soils using a modified azomethine-H procedure. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. New York, 12: 1311-1322.

Peralta, N.R.; Costa, J.L. (2013). Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99, 218-226.

Piikki, K.; Soderstrom, M., Stenberg, B. (2013). Sensor data fusion for topsoil clay mapping. *Geoderma*, 199, 106-116.

Póvoas, I.; Barral, M. F. (1992) – *Métodos de análise de solos*. Série de Ciências Agrárias, 10. IICT.

Ramirez, G.M.; Junior, J.Z. (2010). Estimativa de parâmetros biofísicos de plantios de café a partir de imagens orbitais de alta resolução espacial. *Eng. Agríc.*, v. 30, n. 3, p. 468-479, Jun.

Rhoades, J.D., Raats, P.A., Prather, R.J., 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America* 40: 651–655.

Rhoades, J.D.; Corwin, D.L. (1991). Determining soil electrical conductivity depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Science Society America Journal*, 45: 255-260.

Serrano, J.M.; Peça, J.O.; Silva, J.R.; Shahidian, S. (2010). Medição e mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo em pastagens. *Revista Ciências Agrárias*, v.33, p.5-14.

Silva, A.A. (1957). Caracterização física do solo: modificação do método de Keen & Raczkowski. *Congresso Luso-Espanhol para o progresso das Ciências*, 5, 479-487.

SROA (1973). Folha 27-C Carta dos Solos de Portugal na escala de 1:50000. Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário, Secretaria de Estado da Agricultura, Ministério da Economia, Lisboa.

Stafford, J. (2006) – The role of technology in the emergence and current status of precision agriculture. In: Srinivasan, A. (Ed.) *Handbook of precision agriculture, principles and applications*, pp.19-56.

Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Wiebold, W. J., Batchelor, W. D., Bollero, G. A., Bullock, D. G., Clay, D.E.; Palm, H.L.; Pierce, F.J.; Schuler, R.T.; Thelen, K.D. (2005). Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46, 263–283.

Sudduth, K.A.; Drummond, S.T.; Kitchen, N.R. (2001). Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 31, Issue 3, pp 239-264.

Thornthwaite, C. W. & Mather, J. R. (1957). Instructions and Tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Publications in Climatology, Drexel Institute of Technology, New Jersey.

Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review. London, v.38, pp 55-94.

Triantafyllis, J.; Lesch, S.M. (2005). Mapping clay content variation using electromagnetic induction techniques. Computers and Electronics Agriculture, 46(1-3), 203–237.

Tristany, M. (2010). *Um sistema de informação para a análise multidimensional da atividade agrícola. Aplicação em diversos casos do panorama agrícola nacional*. Dissertação de doutoramento, ISA-UTL, Lisboa.

United States Department of Agriculture (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. L.A. Richards (editor). USDA Handbook 60, U.S.Government Printing Office, Washington D.C.

Veris Technologies. <http://www.veristech.com/>.

Wackernagel, H. (1998). Multivariate Geostatistics, Springer, Berlin, 291p.

Wollenhaupt, N. C.; Wolkowski, R. P. (1994). Grid soil sampling. *Better Crops with Plant Food*, 78 (4): 6–9.

Zarcinas, B.A. (1995). Supression of iron interference in the determination of boron using the azomethine-H procedure. Communications in Soil Science and Plant Analysis. New York, 26: 713-729.

7. Anexos

Anexo 1. Quadro relativo aos dados usados para construção do diagrama ombrotérmico de Gaussen para Santarém, período de 1971 a 2000.

Mês	Temperatura média	Precipitação
Jan	9,6	92,5
Fev	11	79,3
Mar	12,9	50
Abr	14,1	65,7
Mai	16,5	56,2
Jun	20	22,5
Jul	22,6	7,3
Ago	22,7	6,2
Set	21	36,2
Out	17,1	84,3
Nov	13,2	92,2
Dez	10,8	104,1

Anexo 2. Quadro relativo aos dados usados para construção do diagrama ombrotérmico de Gaussen para Santarém, ano de 2016.

Mês	Temperatura média	Precipitação
Jan	12,4	99,5
Fev	11,9	75,1
Mar	12,4	51,7
Abr	14,7	94,4
Mai	17,2	119,1
Jun	21,7	1,8
Jul	25,6	0,8
Ago	25,7	0
Set	23,6	18,8
Out	19,9	36,5
Nov	14,5	70,6
Dez	12,3	93,7

Anexo 3. Quadro relativo à análise de massa volúmica aparente no perfil 1.

		Peso (g)	P cilindro (g)	Diâmetro (cm)	Raio (cm)	altura (cm)	Peso terra (g)	vol cilindro (cm3)	DAP (g/cm³)	Média DAP (g/cm³)
0-20 cm	1.1	718,27	357,38	6,52	3,26	8,516	360,89	284,33	1,27	1,38
	1.2	704,2	293,99	6,62	3,31	8,583	410,21	295,42	1,39	
	1.3	783,69	361,5	6,516	3,258	8,476	422,19	282,65	1,49	
20-45 cm	2.1	856,63	346,27	6,516	3,258	8,543	510,36	284,88	1,79	1,78
	2.2	872,04	357,21	6,54	3,27	8,55	514,83	287,22	1,79	
	2.3	842,64	348,55	6,536	3,268	8,41	494,09	282,17	1,75	
	3.1	788,54	327,55	6,5	3,25	8,04	460,99	266,79	1,73	
80 cm	3.2	799,13	307,76	6,583	3,2915	8,376	491,37	285,08	1,72	1,71
	3.3	828,2	359,01	6,486	3,243	8,53	469,19	281,83	1,66	

Anexo 4. Quadro relativo à análise de massa volúmica aparente no perfil 2.

		Peso (g)	P cilindro (g)	Diâmetro (cm)	Raio (cm)	altura (cm)	Peso terra (g)	vol cilindro (cm3)	DAP (g/cm³)	Média DAP (g/cm³)
0-15 cm	1.1	678,44	346,01	6,533	3,2665	8,46	332,43	283,59	1,17	1,25
	1.2	703,25	350,92	6,523	3,2615	8,503	352,33	284,16	1,24	
	1.3	732,68	355,35	6,523	3,2615	8,503	377,33	284,16	1,33	
15-25 cm	2.1	819,69	348,08	6,523	3,2615	8,51	471,61	284,39	1,66	1,63
	2.2	738,43	287	6,6	3,3	8,583	451,43	293,64	1,54	
	2.3	837,56	355,41	6,53	3,265	8,476	482,15	283,86	1,70	

Anexo 5. Quadro relativo à análise de massa volúmica aparente no perfil 3.

		Peso (g)	P cilindro (g)	Diâmetro (cm)	Raio (cm)	altura (cm)	Peso terra (g)	vol cilindro (cm³)	DAP (g/cm³)	Média DAP (g/cm³)
0-20 cm	1.1	703,92	354,32	6,543	3,2715	8,533	349,6	286,91	1,22	1,31
	1.2	686,84	308,66	6,62	3,31	8,58	378,18	295,32	1,28	
	1.3	748,47	341,55	6,513	3,2565	8,463	406,92	281,95	1,44	
20-30 cm	2.1	780,25	259,65	6,676	3,338	8,876	520,6	310,70	1,68	1,70
	2.2	839,89	283,58	6,67	3,335	8,903	556,31	311,08	1,79	
	2.3	783,8	305,01	6,603	3,3015	8,576	478,79	293,67	1,63	
80 cm	3.1	719,64	253,74	6,67	3,335	8,24	465,9	287,92	1,62	1,64
	3.2	747,25	291,32	6,616	3,308	8,013	455,93	275,47	1,66	
	3.3	808,64	348,07	6,51	3,255	8,44	460,57	280,93	1,64	

Anexo 6. Quadro relativo à determinação da humidade do solo nos 3 perfis e respetivos horizontes amostrados.

Código	Pesa-filtro nº	a - Pesa-filtro g	b - Pesa-filtro+Tsar g	c - Pesa-filtro+TS_{105°C} g	Humidade %
P1-1	7	84,9090	94,5640	94,4280	1,429
P1-2	3	76,3930	85,0560	84,9250	1,535
P1-3	15	56,6310	65,4750	65,2830	2,219
P1-4	58	70,4720	80,4850	80,3900	0,958
P1-5	45	51,6470	61,7870	61,6900	0,966
P2-1	16	61,0060	70,6080	70,3370	2,904
P2-2	42	60,6420	70,2680	69,9840	3,040
P2-3	19	61,9190	72,8060	72,4640	3,243
P2-4	22	61,1430	72,4750	72,1690	2,775
P2-5	31	61,8180	71,2970	71,1950	1,088
P3-1	11	47,3790	57,0210	56,9280	0,974
P3-2	23	65,5260	76,9570	76,8760	0,714
P3-3	33	59,8200	71,9340	71,8080	1,051
P3-4	1	67,4220	76,1270	76,0050	1,421

Anexo 7. Quadro relativo à determinação da massa de EG (elementos grosseiros) nos 3 perfis e respectivos horizontes amostrados.

Amostra	Terra Fina	EG	Terra total	Terra Fina	EG
	g	g		g kg-1	g kg-1
P1 - 1	465,36	4,71	470,07	989,98	10,02
P1 - 2	382,76	12,7	395,46	967,89	32,11
P1 - 3	426,99	22,24	449,23	950,49	49,51
P1 - 4	559,24	20,48	579,72	964,67	35,33
P1 - 5	405,75	14,92	420,67	964,53	35,47
P2 - 1	392,66	2,38	395,04	993,98	6,02
P2 - 2	463,19	4,66	467,85	990,04	9,96
P2 - 3	410,69	0	410,69	1000,00	0,00
P2 - 4	416,08	0	416,08	1000,00	0,00
P2 - 5	431,42	0	431,42	1000,00	0,00
P3 - 1	587,73	9,49	597,22	984,11	15,89
P3 - 2	405,15	12,96	418,11	969,00	31,00
P3 - 3	502,74	10,57	513,31	979,41	20,59
P3 - 4	342,11	11,56	353,67	967,31	32,69

Anexo 8. Quadro relativo à análise mecânica efetuada nos 3 perfis e respetivos horizontes amostrados.

Código	H %	TS_{ar} g	TS_{105°C} g	AG g	T g	T+AF g	T g	T+L+A+EB g	T g	T+A+EB g	EB g	A.G %	A.F %	L %	A %	Total %	A.G %	A.F %	L %	A %	Total %
P1 - 1	1,429	20,47	20,18	2,07	51,22	59,53	104,88	105,14	116,66	116,79	0,019	10,28	41,19	25,45	22,76	99,7	10,31	41,32	25,53	22,83	100,0
P1 - 2	1,535	20,18	19,88	1,98	47,17	54,99	102,80	103,07	162,23	162,39	0,019	9,98	39,34	22,25	28,27	99,8	9,99	39,40	22,29	28,31	100,0
P1 - 3	2,219	20,43	19,99	1,45	47,37	54,90	102,22	102,51	132,03	132,21	0,019	7,25	37,68	22,31	31,97	99,2	7,31	37,98	22,49	32,23	100,0
P1 - 4	0,958	20,10	19,91	4,83	48,58	56,71	79,99	80,19	110,28	110,38	0,019	24,28	40,79	18,00	16,62	99,7	24,36	40,92	18,06	16,67	100,0
P1 - 5	0,966	20,02	19,83	3,38	51,05	60,48	112,68	112,88	106,75	106,85	0,019	17,06	47,54	19,11	16,26	100,0	17,07	47,55	19,11	16,27	100,0
P2 - 1	2,904	20,04	19,47	1,50	44,51	50,52	80,31	80,62	111,24	111,43	0,019	7,70	30,83	25,55	35,78	99,9	7,71	30,87	25,59	35,83	100,0
P2 - 2	3,040	20,01	19,42	1,46	47,41	53,27	110,49	110,80	138,03	138,22	0,019	7,50	30,18	25,60	35,26	98,5	7,61	30,63	25,98	35,78	100,0
P2 - 3	3,243	20,03	19,40	0,12	47,60	52,45	107,54	107,92	155,10	155,32	0,019	0,62	25,00	34,61	39,52	99,8	0,62	25,06	34,70	39,62	100,0
P2 - 4	2,775	20,07	19,53	0,53	45,96	54,11	107,02	107,31	136,44	136,59	0,019	2,70	41,73	27,47	27,47	99,4	2,72	41,99	27,64	27,64	100,0
P2 - 5	1,088	20,11	19,89	13,37	49,18	51,90	120,04	120,15	133,00	133,09	0,019	67,21	13,67	4,73	13,47	99,1	67,83	13,80	4,77	13,60	100,0
P3 - 1	0,974	20,04	19,84	4,01	45,04	54,48	149,57	149,74	79,04	79,12	0,019	20,22	47,56	18,83	12,76	99,4	20,35	47,86	18,95	12,84	100,0
P3 - 2	0,714	20,07	19,93	4,14	47,96	57,42	108,35	108,53	95,80	95,87	0,019	20,77	47,45	21,27	10,21	99,7	20,83	47,59	21,34	10,25	100,0
P3 - 3	1,051	20,06	19,86	3,36	46,77	54,66	107,58	107,82	108,05	108,15	0,019	16,94	39,75	26,83	16,52	100,0	16,93	39,73	26,82	16,51	100,0
P3 - 4	1,421	20,09	19,81	3,52	46,62	54,59	107,51	107,73	116,84	116,98	0,019	17,78	40,23	17,26	24,31	99,6	17,86	40,40	17,34	24,41	100,0

Anexo 9. Quadro relativo às análises de solos da parcela Lameiras realizadas na UTAD.

Número da amostra	pH água	pH KCl	mat org (%)	P Egner-Riehm (mg P2O5/kg)	K Egner-Riehm (mg K2O/kg)	P-Olsen (mg P2O5/kg)	Ca troca (cmol (c)/kg)	Mg troca (cmol (c)/kg)	K troca (cmol (c)/kg)	Na troca (cmol (c)/kg)	Acidez 7,0 (cmol (c)/kg)	Condutividade de (dS/m)	N total (g/kg)	relação C/N	B ext água fervente (mg B/kg)	Zn - extr Lindsay (mg Zn/kg)	Cu - extr Lindsay (mg Cu/kg)	Mn - extr Lindsay (mg Mn/kg)	Fe - extr Lindsay (mg Fe/kg)	arg grossa (g/kg)	arg fina (g/kg)	limo (g/kg)	argila (g/kg)
1	6,9	6,2	1,46	62	277	39	6,3	1,62	0,63	0,29	1,2	0,116	0,91	9,3	0,058	0,43	0,7	18	22,31	.	.	.	.
2	6,9	6,2	2,23	115	414	61,6	12,77	1,99	0,94	0,42	1,5	0,047	1,27	10,2	0,428	0,53	0,85	20,04	24,6	.	.	.	.
4	6,8	6,2	1,55	80	359	40,3	10,6	1,79	0,82	0,38	1,2	0,061	0,92	9,8	0,568	0,27	0,68	8,62	14,74	.	.	.	.
5	6,9	6,2	1,53	62	321	35,8	9,45	2,47	0,81	0,35	1,8	0,1	0,94	9,4	0,28	0,28	0,63	10,08	17,98	.	.	.	.
9	7,4	6,6	1,67	61	338	26	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
10	7,3	6,4	1,69	24	342	14,1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
11	7,3	6,4	1,42	28	295	16,2	16,04	3,93	0,67	0,53	0,6	0,052	0,91	9,1	0,562	0,9	0,6	19,23	10,4	.	.	.	.
13	7,2	6,3	1,88	51	301	26,9	10,86	3,05	0,68	0,38	1,2	0,079	1,15	9,5	1,598	1,48	0,76	37,17	13,55	158,5	218,7	259,3	363,5
15	7,1	6,4	2,37	155	596	61,5	17,54	4,92	1,44	0,41	0,9	0,08	1,34	10,3	1,188	2,52	0,98	46,12	45,25	.	.	.	.
16	7	6,4	1,74	70	444	35,2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
17	7,2	6,4	1,53	58	359	32,2	8,78	2,64	0,82	0,31	0,9	0,078	0,96	9,3	0,242	1,3	0,68	42,72	13,68	.	.	.	.
18	7	6,3	1,84	65	597	39	8,61	2,56	1,29	0,32	1,2	0,061	1,05	10,2	1,138	2,19	0,9	68,65	18,47	.	.	.	.
19	7,4	6,7	1,68	88	402	55,3	10,33	2,65	0,92	0,38	0	0,064	1,01	9,7	0,432	1,63	1,24	24,19	26,68	.	.	.	.
20	7,1	6,4	1,89	90	345	64,1	10,59	2,89	0,88	0,4	1,2	0,074	1,08	10,1	0,562	2,55	0,9	29,86	26,9	174,1	334,3	234,4	257,2
21	7,1	6,3	1,86	148	399	71	7,72	2,23	0,88	0,31	2,1	0,064	1,05	10,3	0,102	2,09	0,97	61,47	37,73	.	.	.	.
22	7,2	6,5	1,59	71	386	35,8	6,91	2	0,87	0,34	0,9	0,066	0,93	9,9	0,656	1,51	0,66	39,93	23,54	.	.	.	.
23	7,3	6,4	1,36	28	302	12	8,53	2,78	0,66	0,34	0,9	0,055	0,83	9,5	0,22	0,85	0,33	16,59	12,99	175,2	392,7	145	287,1
24	7,2	6,4	1,74	17	382	9	10,09	3,21	0,86	0,42	0,6	0,083	1	10,1	0,324	0,92	0,36	13,39	11,23	.	.	.	.
25	7,1	6,3	1,56	71	403	34,3	14,08	3,94	1,1	0,46	1,2	0,059	0,97	9,3	0,414	1,27	0,79	40,95	15,79	127,2	324,6	249,5	298,7
31	7	6,3	1,92	115	321	36,5	6,54	1,77	0,72	0,3	1,2	0,09	1,08	10,3	1,238	3,47	3	46,5	23,79	.	.	.	.
32	7,1	6,4	1,85	74	267	31,9	7,01	2,03	0,59	0,3	0,6	0,105	1,06	10,1	0,164	2,69	4	52,41	17,47	106,4	380,7	234,4	278,5
33	7	6,3	1,77	90	417	41,9	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
34	7,1	6,4	1,64	90	332	35,7	7,12	2,01	0,72	0,3	0,9	0,068	0,99	9,6	0,18	2,94	2,81	42,4	15,66	.	.	.	.
41	6,8	6,2	1,74	104	332	50,8	7,77	2,03	0,74	0,28	0,9	0,07	1,01	10	0,164	3,75	3,93	56,26	19,46	.	.	.	.
47	6,9	6,2	1,72	58	357	42	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
48	7	6,4	1,78	37	315	20,9	12,4	3,65	0,74	0,41	0,6	0,083	1,03	10	0,5	1,34	0,66	36,92	11,15	.	.	.	.
51	7,1	6,4	1,5	29	387	20,5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
52	6,9	6	1,7	36	295	26,1	8,35	2,58	0,66	0,14	2,1	0,061	1,01	9,8	0,356	1,51	0,85	31,26	23,96	.	.	.	.
53	7,2	6,5	1,79	51	422	28,7	10,7	2,8	0,95	0,17	0,3	0,095	1,06	9,8	0,804	1,69	0,8	25,51	12,08	157,7	250,2	227,2	364,9
57	7,1	6,4	1,54	46	283	23,2	6,15	1,72	0,64	0,31	0,9	0,067	0,92	9,7	0,406	1,25	0,64	39,58	15,27	197,9	441,5	167,6	193
58	7	6,3	1,07	57	337	27,4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
59	7,1	6,3	1,43	42	402	25,9	5,93	1,81	0,89	0,22	1,2	0,059	0,89	9,3	0,542	1,04	0,68	32,19	24,82	.	.	.	.
62	7,2	6,3	1,26	48	346	28,9	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
63	7,3	6,6	2,21	110	620	47,7	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
65	7,2	6,5	2,41	27	292	13,7	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
60 S	7,4	6,8	1,74	108	385	43,9	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
64	7,1	6,4	1,85	125	245	58,9	9,88	2,64	0,61	0,37	0,9	0,066	1,08	9,9	0,896	3,52	4,17	57,91	23,93	.	.	.	.
66	7,3	6,7	1,36	33	658	11,2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
67	6,9	6,2	1,57	58	290	30,7	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
68	6,8	6,2	1,31	63	336	26,9	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
70	7	6,3	1,8	68	362	24,9	13,07	3,6	0,85	0,44	1,2	0,052	1,06	9,9	1,172	1,25	0,86	26,43	16,68	.	.	.	.

Anexo 10. Quadro relativo às recomendações de fertilização propostas pela UTAD

Número da amostra	N (kg/ha)	P2O5 (kg/ha)	K2O (kg/ha)	Mg (kg/ha)	B (kg/ha)	Zn (kg/ha)	Cu (kg/ha)	Mn (kg/ha)	Fe (kg/ha)
1	330	150	200	60	2.5	6	3	1	1
2	320	125	100	60	1.5	4	3	1	1
4	320	150	150	60	1.5	6	3	2	2
5	320	150	150	50	2	6	3	2	1
9	320	175	150	-	-	-	-	-	-
10	320	200	150	-	-	-	-	-	-
11	330	200	200	40	1.5	4	3	1	2
13	320	175	150	50	1	2	3	0	2
15	320	125	100	20	1	2	3	0	0
16	320	150	100	-	-	-	-	-	-
17	320	175	150	50	2	2	3	0	2
18	320	150	100	50	1	2	3	0	1
19	320	150	100	50	1.5	2	2	1	0
20	320	125	150	50	1.5	2	3	1	0
21	320	125	150	50	2.5	2	3	0	0
22	320	150	150	60	1.5	2	3	0	1
23	330	200	150	50	2	4	4	1	2
24	320	200	150	40	2	4	4	1	2
25	320	150	100	40	1.5	2	3	0	2
31	320	150	150	60	1	1	1	0	1
32	320	175	200	60	2.5	2	1	0	1
33	320	150	100	-	-	-	-	-	-
34	320	150	150	60	2.5	2	1	0	2
41	320	150	150	60	2.5	1	1	0	1
47	320	150	150	-	-	-	-	-	-
48	320	175	150	40	1.5	2	3	0	2
51	330	175	150	-	-	-	-	-	-
52	320	175	200	50	2	2	3	0	1
53	320	175	100	50	1.5	2	3	1	2
57	320	175	200	60	2	2	3	0	2
58	330	175	150	-	-	-	-	-	-
59	330	175	100	60	1.5	4	3	0	1
62	330	175	150	-	-	-	-	-	-
63	320	150	100	-	-	-	-	-	-
65	320	200	200	-	-	-	-	-	-
60 S	320	150	150	-	-	-	-	-	-
64	320	125	200	50	1.5	1	1	0	1
66	330	200	100	-	-	-	-	-	-
67	320	175	200	-	-	-	-	-	-
68	330	175	150	-	-	-	-	-	-
70	320	175	150	40	1	2	3	1	1